

Bachelorarbeit

Praktikumsanleitung *zur Durchführung von statischen und zyklischen Versuchen*

MTS Landmark – Servohydraulic Test System



Hochschule Mittweida (FH)
University of Applied Sciences

Seminargruppe: SM08w1-B
Bearbeiter: Michael Niemann
Datum: 17.12.2014

Erstleser: Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner
Zweitleser: Dipl.-Ing. Ulrike Hähnel

Vorwort

Meine Bachelorarbeit befasst sich auf Anregung von Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner mit der Erstellung einer Praktikumsanleitung zur Durchführung von statischen und zyklischen Versuchen. Die Versuche werden mittels Prüfmaschine, der sogenannten "Landmark – Servohydraulic Test System" von MTS durchgeführt.

Mit dieser Prüfmaschine ist es möglich realitätsnahe Lastspiele nachzuspielen, um so später Aussagen über die Langlebigkeit eines Werkstoffes treffen zu können. Der große Anreiz in diesem Projekt befand sich darin, dass diese Anleitung in ihrer Nachhaltigkeit von großem Nutzen sein kann. Schon in naher Zukunft werden statische, als auch zyklische Versuche durch die Studierenden der Hochschule Mittweida durchgeführt. Diese Anleitung soll im Nachhinein als Nachschlagewerk dienen. Da das Thema Bruchmechanik sehr breit gefächert und teilweise sehr komplex ist, war es notwendig, dass ich mich als Quereinsteiger intensiv mit der Thematik auseinandersetzte. Hierzu zählen Abläufe, Kurveninterpretation und die Auseinandersetzung mit dem Fachvokabular.

Vor der eigentlichen Erstellung dieser Arbeit und für die erfolgreiche Durchführung solcher Tests, war es notwendig vorhandene Fehler im Quelltext der MTS Software aufzufinden und diese zu beheben. Diese Fehlerbehebung führte gleichzeitig zu einem besseren Verständnis des Programms und deren Ablauf solcher Testprozeduren.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme der Prüfmaschine war es notwendig diese zu kalibrieren. Hierfür waren probenabhängige Parameter notwendig, die bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorlagen. Nach Rücksprache mit Prof. Dr.-Ing. Hübner führte der sogenannte "Markerloadtest" zur korrekten Einrichtung und Kalibrierung der Maschine. Trotz mangelnder Literatur und Publikationen über dieses Testverfahren, war es mir dennoch möglich auch diese Problemstellung zu lösen.

Durch die Erstellung proben- und versuchsabhängiger Templates wurde der Arbeitsaufwand zur Durchführung zyklischer bzw. statischer Tests minimiert. Die Templates sind so ausgerichtet, dass im Idealfall nur die Probenabmessungen definiert werden müssen. Sämtliche restlichen Werte wurden standardisiert und müssen nicht mehr geändert werden. Die Templates orientieren sich besonders an SEB-Proben aus Stahl.

Des Weiteren wurde die Software um eine neue Funktion ('Fix Specimen') erweitert. Diese ist dafür gedacht, eine Probe unter Beobachtung der Stationssignale und mittels Computersteuerung einzuspannen.

Diese Funktion hat dabei zwei entscheidende Vorteile.

Zum einen wird das Maß an Sicherheit erhöht, da die Einspannung von nun an über den Computer vorgenommen wird und somit das Risiko einer Quetschung der Hände enorm gesenkt wird. Zum anderen wird vermieden, dass man die Probe bereits durch das manuelle ('von Hand') Einspannen zerbricht oder andersweitig vorbelastet.

Das vom Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner vorgeschlagene Thema war sehr interessant und hat meinen Horizont und mein Verständnis zur Bruchmechanik erweitert. Dafür danke ich Ihnen. Ebenfalls möchte ich mich für die gute Betreuung zum einen durch den Professor, aber auch durch die Mitarbeiterin Dipl.-Ing. Ulrike Hähnel bedanken. Ebenfalls muss ich mich bei den beiden Mitarbeitern B.Eng. André Dömpke, für die Unterstützung während der Programmierung, sowie Dipl.-Ing. Frank Poschmann, für die Unterstützung mikroskopischer Untersuchungen, danken.

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlagen.....	7
1.1. Definitionen & Normen zur Bruchmechanik.....	7
1.2. MTS Landmark – Servohydraulic Test System.....	10
1.3. Sicherheitshinweise.....	11
2. Versuchsaufbau & Durchführung.....	12
2.1. Probestücken analysieren & vorbereiten.....	12
a) Probenabmessungen.....	12
b) Probenvorbereitung.....	14
2.2. MTS Landmark (100kN) justieren und reinigen.....	16
2.3. Einschalten der benötigten Geräte.....	18
2.4. Software starten.....	21
a) Station Manager.....	21
b) MTS Test Suite / Multipurpose Elite (MPE).....	23
2.5. Proben einspannen	24
2.6. Proben auswerten.....	27
3. Ausführung eines statischen Versuchs.....	32
3.1. Template-Wahl & Einführung.....	32
3.2. Parameter.....	32
3.3. Crack Size Check durchführen.....	34
3.4. Precrack initiieren	35
3.5. JIC Test.....	36
3.6. Auswertung der Probe 34S-24.....	37
a) Crack-Size-Check.....	37
b) Precrack.....	37
c) JIC-Test.....	38
4. Ausführen eines zyklischen Versuchs.....	39
4.1. Template-Wahl & Einführung.....	39
4.2. Parameter.....	39
4.3. Crack Size Check durchführen.....	41
4.4. Precrack initiieren	41
4.5. FCG Test – Fatigue Crack Growth Test.....	42
4.6. Auswertung der Probe 34Z-6.....	43
a) Crack-Size-Check.....	43
b) Precrack.....	43
c) FCG-Test.....	44
5. Vergleich zwischen zyklischer und statischer Probe	45
5.1. Einführung.....	45
5.2. Vergleich zwischen den Proben	45
5.3. Fazit.....	46
6. Fehlerquellen & Fehleranalyse.....	47
6.1. Einführung.....	47
6.2. Vom Menschen verursachte Fehler	47
6.3. Von der Maschine verursachte Fehler	48

7. Quellenverzeichnis & Glossar.....	49
7.1. Glossar.....	49
7.2. Quellenverzeichnis.....	50
8. Anhang I - Markerloadtest.....	51
8.1. Definition – Was ist ein Markerloadtest?.....	51
8.2. Versuchsdurchführung (anhand einer Probe 34Z-5).....	52
8.3. Auswertung.....	57
9. Anhang II – Messergebnisse Probe 34S-24.....	62
10. Anhang III – Messergebnisse der Probe 34Z-6.....	66

1. Grundlagen

1.1. Definitionen & Normen zur Bruchmechanik

▪ Bruchmechanik – was versteht man darunter?

Die Bruchmechanik befasst sich mit dem Versagen rissbehafteter Bauteile bzw. der Ausbreitung von Rissen unter statischen und zyklischen Belastungen bis zum Bruch. Dabei kann untersucht werden mit welcher Belastung ein Riss wachsen und in welche Richtung er sich ausbreiten würde. Des Weiteren kann man Aussagen dazu treffen, ab wann die Belastung für den Riss kritisch wird und zu einem Bruch führen könnte.

▪ Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM):

Die linear-elastische Bruchmechanik ist besonders für spröde Werkstoffe geeignet. Bei diesem Konzept geht man davon aus, dass die Spannung an der Risspitze unendlich groß. Dies würde bedeuten, dass selbst der kleinste Riss bereits ein Bruch hervorrufen könnte. Aus diesem Grund wurde ein Spannungsintensitätsfaktor K eingeführt, welcher die Risszähigkeit einbezieht und somit eine Aussage treffen kann, ob ein Riss stillsteht, wächst oder sogar zum Bruch führt. Man spricht oftmals auch von dem K -Konzept.

Der Spannungsintensitätsfaktor K lässt sich wie folgt berechnen:

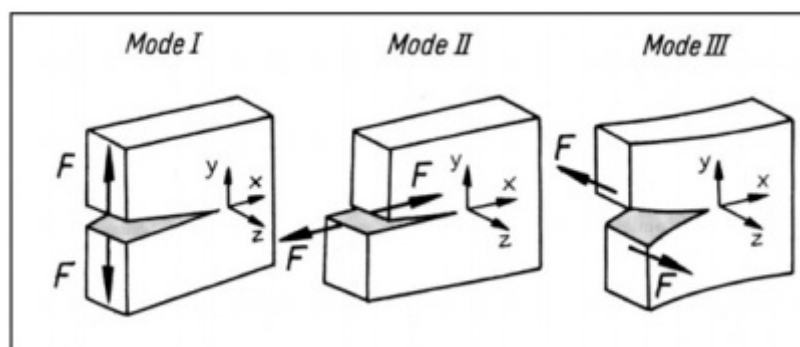
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y \left(\frac{a}{W} \right)$$

σ ... Spannung

a ... Risslänge

Y ... Bauteilgeometrie abhängige Korrekturfkt.

Je nach Rissöffnungsmodus wird dabei zwischen K_I , K_{II} , K_{III} unterschieden.



Mode I: Fasst alle Beanspruchungen zusammen, die ein Öffnen der Rissflanken bewirken. Dabei wird ein instabiles Risswachstum verursacht, sobald die Beanspruchungsgröße den kritischen Werkstoffkennwert erreicht oder überschreitet. Es kommt zum Spröbruch.

$$K_I \geq K_{I,c}$$

Mode II: Fasst alle Beanspruchungen zusammen, die eine entgegengesetzte Verschiebung der Rissflanken in Rissausbreitungsrichtung hervorrufen, meist durch eine Schubbelastung hervorgerufen.

Mode III: Fasst alle Beanspruchungen zusammen, die eine Verschiebung der Rissflanken quer zur Rissausbreitungsrichtung bewirken.

Mixed-Mode: Ist ein Fall in dem alle drei Moden zusammen an einer Rissfront auftreten.

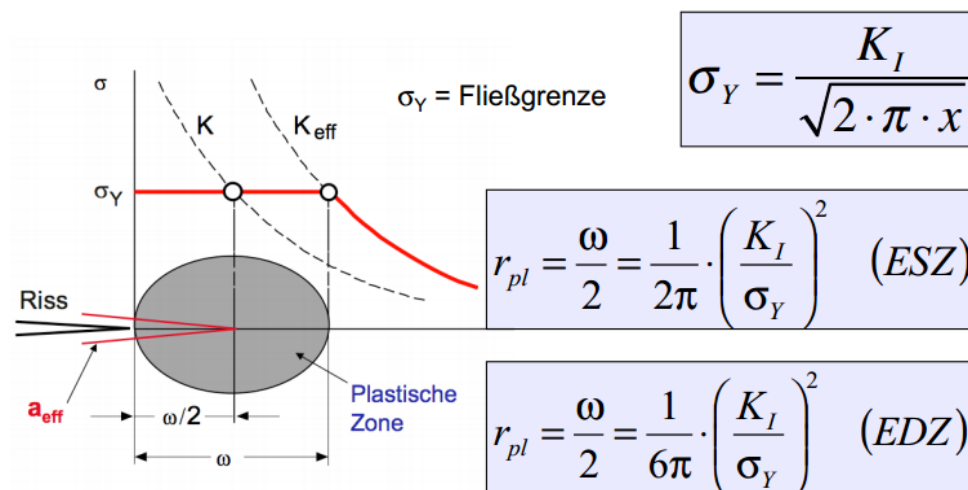
Neben dem K-Konzept gibt es noch das K_{eff} -Konzept, welches die Ausbildung plastischer Zonen durch Spannungsabbau beinhaltet.

Die plastische Zone wird direkt vor der Risspitze erzeugt.

Es kann mit der linear-elastischen Bruchmechanik gearbeitet werden, solange die plastische Zone sehr klein gegenüber der Bauteilgeometrie ist.

Die dafür vorgesehenen Grenzwerte können der entsprechenden ASTM-Norm entnommen werden.

Die Größe der plastischen Zone lässt sich berechnen über:



Grenzen der Anwendbarkeit der Linear-elastischen Bruchmechanik:

- sobald ein Werkstoff sich teilweise duktil verhält wird FBM angewendet
- plastische Zone kleiner als Bauteilgeometrie (<10%)
- Beanspruchung maximal 60% der Fließlast

▪ **Fließbruchmechanik (FBM):**

Die Fließbruchmechanik ist besonders für duktile Werkstoffe geeignet.

Es werden alle Methoden der Bruchmechanik zusammengefasst, die zusätzlich zur linear-elastischen Rissausbreitung auch plastische Verformungen in der Umgebung des Risses berücksichtigen.

Es wird in zwei verschiedene Konzepte unterschieden. Zum einen in das J-Integral-Konzept, sowie das C(T)OD-Konzept.

C(T)OD-Konzept [Crack-(Tip)-Opening-Displacement]:

Das C(T)OD-Konzept beruht auf der Annahme, dass bei duktilem Werkstoffverhalten der Bruchvorgang nicht mehr von der Spannungsintensität, sondern von der plastischen Verformung an der Risspitze kontrolliert wird. Ein Maß dafür ist die Aufweitung an der Risspitze, die als Risspitzenverschiebung oder Rissöffnung bezeichnet wird. Es wird also untersucht, ob beim Einsetzen der Rissverlängerung die Aufweitung der Risspitze einen kritischen Wert δ_c überschreitet.

$$\delta = m \cdot \frac{K_I^2}{E \cdot \sigma_t} \geq \delta_c$$

J-Integral-Konzept:

Das J-Integral ist eine weitere Beanspruchungskenngröße und ist ein Linienintegral mit geschlossenem Integrationsweg um die Risspitze, welches auch bei großer plastischer Zone den Zustand an der Risspitze beschreibt. Das J-Integral wird bestimmt aus der Änderung der potentiellen Energie dU bezogen auf die bildende Rissfläche da. Die Bruchbedingung des J-Integrals ist folglich:

$$J_I = \frac{-dU}{B \cdot da} \geq J_{I,c}$$

Für die Bruchmechanik gelten folgende Normen:

- ISO FDIS 12135 – Prüfverfahren zur Bestimmung der quasistatischen Bruchzähigkeit
- ASTM E647-05 – Standard Methoden zur Messung v. Ermüdungsrisswachstumsraten
- ASTM E1820 – Standard Methoden zur Messung v. (statischen) Brüchen

1.2. MTS Landmark – Servohydraulic Test System

MTS ist ein amerikanisches Unternehmen mit Sitz in Minneapolis (Minnesota), welches sich auf Mess- und Sensorentechnik, sowie Test- und Simulationssystemen spezialisiert hat. Neben Füllstandssensoren und Wegaufnehmer bietet das Unternehmen ebenfalls Produkte zum Testen von Werkstoffen an, welche wiederum auf verschiedenster Art und Weise belastet werden können. Dadurch ist es möglich beispielsweise Aussagen über die Langlebigkeit oder das Verhalten eines Werkstoffes unter gewissen Umständen zu treffen. Um solche Tests durchführen zu können entwickelte das Unternehmen eine Prüfmaschine mit dem Namen 'Landmark – Servohydraulic Test System'. Mit Hilfe dieser Maschine ist es möglich Versuche zur Bruchmechanik zu führen und so Proben zyklisch, sowie auch statisch zu belasten.

Es können Umstände untersucht werden, ab wann beispielsweise Risse für ein Bauteil kritisch sein können. Ebenfalls können Aussagen dazu getroffen werden, ob und wie sich ein Riss ausbreiten würde. Die Maschine ist so konfigurierbar, so dass reale Bedingungen nachgebildet werden können.

Die Hochschule Mittweida besitzt zwei verschiedene Prüfmaschinen des Typs 'Landmark – Servohydraulic Test System'.

Zum einen besitzt sie eine Prüfmaschine mit einer Maximallast von 500kN, welche für größere Versuche (große Bauteile) geeignet ist. Des Weiteren besitzt sie eine zweite Prüfmaschine mit einer Maximallast von 100kN für kleinere Testversuche.

Diese Praktikumsanleitung orientiert sich speziell auf die zweite Prüfmaschine mit 100kN. Dennoch sollte diese Anleitung im weitesten Sinne analog dazu auch auf der großen Prüfmaschine anwendbar sein.



Abbildung: MTS Landmark

1.3. Sicherheitshinweise

Damit der Umgang mit der Maschine gewährleistet werden kann müssen einige Sicherheitshinweise befolgt werden.

Zum Thema Arbeitsschutz sieht der Hersteller demnach das Tragen von Schutzbrillen und einem Gehörschutz vor. Des Weiteren sollte die Maschine nur unter Beobachtung von Professoren oder autorisiertem Fachpersonal der Hochschule Mittweida benutzt werden.

Um Verletzungen zu vermeiden ist es wichtig der Maschine mit einem gewissen Respekt gegenüberzutreten. Schließlich kann selbst die kleine Prüfmaschine Kräfte bis zu 100kN aufbringen. Das entspräche also einer Belastung von 10 Tonnen, die bei falschem Umgang schnell Körperteile, wie Hände und Finger, zerquetschen könnte.

Damit dies nicht passiert sollte eine Aufgabe nach der anderen erledigt werden und nicht versucht werden eine Probe beispielsweise auszurichten und im selben Moment die Maschine zu bedienen. Das Einschalten der 'ausschließlichen Regelung' am Computer verringert das Verletzungsrisiko noch einmal zusätzlich, da die Maschine dann ausschließlich vom Computer aus gesteuert werden kann und einen Fremdzugriff verweigert.

Um Überraschungen zu vermeiden ist darauf zu achten, dass vor dem Starten der Hydraulik die korrekte Regelart ('Displacement') aktiv ist. Nachzulesen ist dies im Station-Manager unter 'Manueller Sollwert' (siehe auch: Kapitel 2.4a, Abs. 4).

Sollte dennoch etwas passieren ist es möglich die Maschine über den Notausschalter abzuschalten.

2. Versuchsaufbau & Durchführung

2.1. Probestücken analysieren & vorbereiten

In diesem Experiment werden für den 3-Punkt-Biegeversuch Proben aus **34CrNiMo6 + QT** mit einer Länge $L = 100\text{mm}$ verwendet.

Je nach Versuch können sich die Proben von einander unterscheiden. Zum einen gibt es Proben für statische Versuche, sowie auch zyklische Versuche.

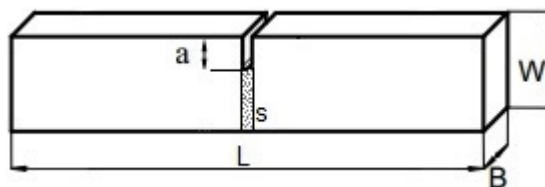
So besitzen Proben für statische Versuche einen großen Kerb von $\sim 8\text{mm}$ und zusätzlichen Seitenkerben, wohin gegen Proben für einen zyklischen Versuch einen kleinen Kerb von $\sim 2\text{mm}$ aufweisen.



Als Beispiel einer Probenanalyse und einer Probenvorbereitung wird eine Probe für den statischen Versuch herangezogen. Die Vorgehensweise für einen zyklischen Versuch kann analog dazu durchgeführt werden.

a) Probenabmessungen

Bezeichnung der Abmessungen



$B = 10\text{mm}$

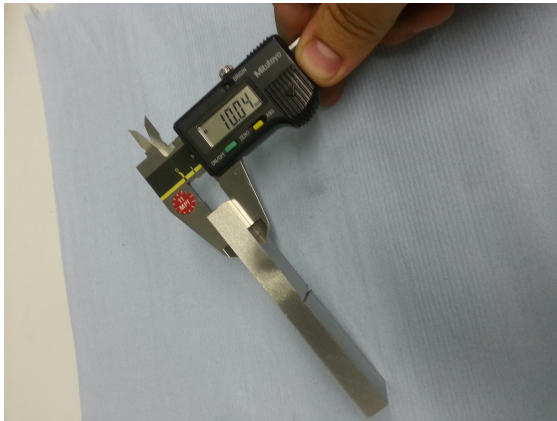
$L = 100\text{mm}$

$W = 2B$ (für Normalproben) bzw. $B \dots 4B$ (für Alternativproben)

$a = 8\text{mm}$ (für statische Proben) bzw. 2mm (für zyklische Proben)

$s = 1\text{mm}$ pro Seite (Seitenkerben, nur bei statischen Proben)

Messen von Dicke 'B'

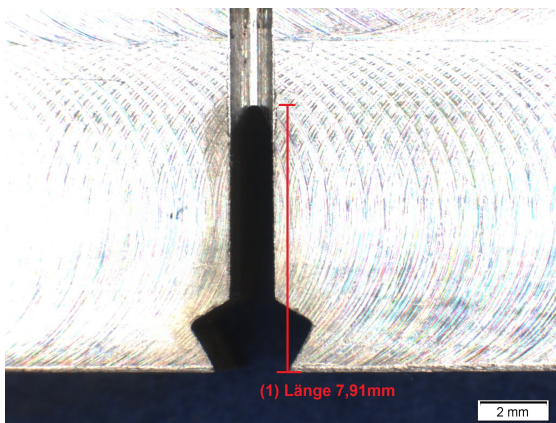


Messen von Höhe 'W'



* Messungen können von geforderten Werten abweichen.
Dies ist auf Fertigungstoleranzen zurückzuführen.

Messen von Kerbtiefe 'a'



Messen der Kerbtiefe einer Stahlbauprobe

Die Kerbtiefe wird mit Hilfe eines Stereomikroskops gemessen.

Zu Beginn wird am Stereomikroskop das Licht eingeschaltet. Dazu den grünen Schalter am oberen Kasten links vom Stereomikroskop einschalten.

Nun wird die Probe so unter das Stereomikroskop gelegt, so dass die Kerbe vollständig zu sehen ist. Anschließend wird mittels Computer und der Software 'Stream Start Essential' die Probe ausgemessen.

Benutzer:	Stereo
Passwort:	Stereo

Um ein Bild der Probe zu bekommen muss das Live-Bild zugeschaltet werden. Nun sollte man am Stereomikroskop das Objektiv mit der Bezeichnung '1x' nutzen und die Vergrößerung am kleinen Drehrad auf '0,7x' stellen. Es ist darauf zu achten, dass in der Software (oben rechts) ebenfalls das Objektiv '1x' und die Vergrößerung von '0,7x' ausgewählt sind. Ist alles korrekt eingestellt kann nun ein Einzelbild über das Kamera-Symbol geschossen werden, welches wiederum über das Menü Messen → vertikale Linie ausgemessen werden kann. Die Messung kann nun über das Menü Datei → Speichern unter... als Bild gespeichert werden.

b) Probenvorbereitung

Für die Probenvorbereitung werden folgende Komponenten benötigt:

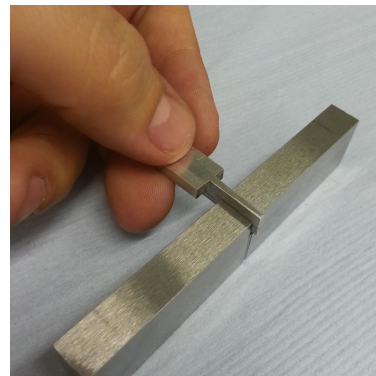
- Schleifpapier
- Sekundenkleber
- Anschlag / Hilfskonstruktion für Messschneiden
- Messschneiden



1

Probenoberfläche mittels Schleifpapier aufräumen, um eine bessere Haftung des Sekundenklebers zu erreichen.

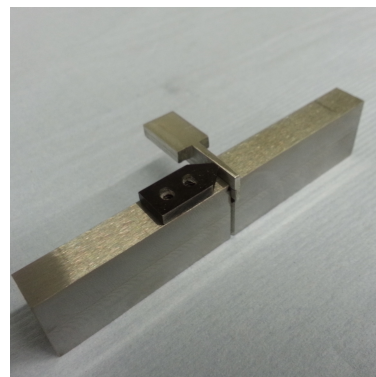
Nun wird der Anschlag in die Kerbe gelegt.



2

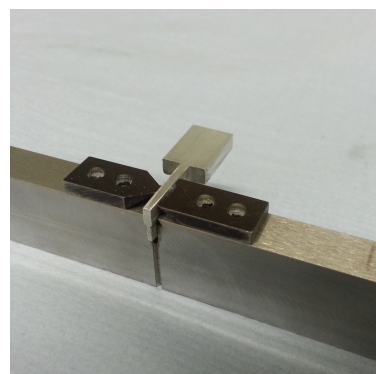
Anschließend wird die erste Messschneide mit der spitzen Seite nach oben und in Richtung des Anschlags aufgelegt.

Zum fixieren wird die Messschneide vorher dünn mit Sekundenkleber bestrichen und auf die Probe aufgelegt und an den Anschlag gelegt.



Kurz Halten bis der Kleber ausgehärtet ist.

Analog dazu wird die zweite Messschneide gegenüber aufgeklebt.



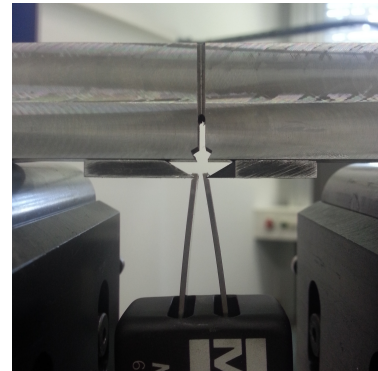
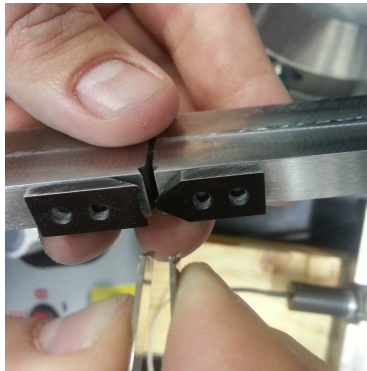
Man beachte:

Die Messschneiden sollten gerade aufgelegt werden, um Messfehler zu vermeiden.



③

Nun wird das COD-Messgerät zwischen die Messschneiden geklemmt. Man beachte, dass die Messschneiden in die Kerben am COD greifen. Anschließend wird die Probe auf die Auflager an der MTS Landmark mit den Messschneiden nach unten gelegt.



④

Die Probe ist damit im weitesten Sinne bereit für den 3-Punkt-Biegeversuch. Sie muss lediglich noch mittig ausgerichtet und eingespannt werden.

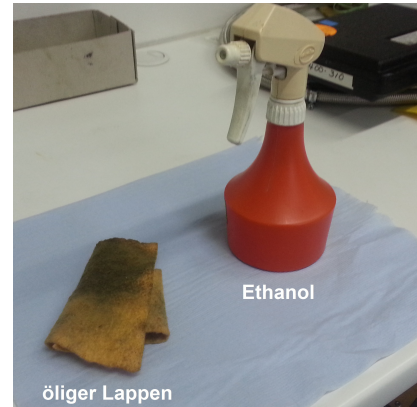
Siehe dazu: Abschnitt 2.5. Proben einspannen

2.2. MTS Landmark (100kN) justieren und reinigen

Damit die Maschine zuverlässige Werte erzielt ist es wichtig die Maschine vorher zu justieren und auch zu reinigen, da es sonst zu ungewollter Reibung kommen könnte, welche die Ergebnisse verfälschen würde. Diese Schritte sollten bei Erstbenutzung immer ausgeführt werden, da man sich nicht sicher sein kann, ob jemand anderes bereits mit der Maschine gearbeitet hat.

1

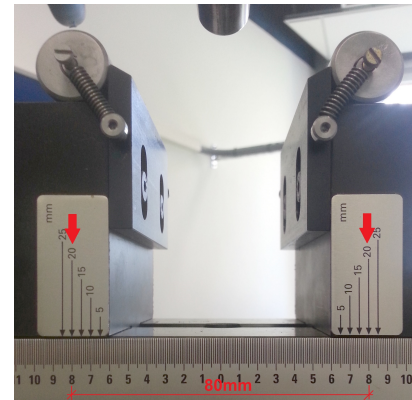
In erster Linie werden die Auflager, sowie der Stempel mittels Ethanol und einem öligen Lappen gereinigt.



2

Nun werden die Auflagerabstände eingestellt. Da in diesem Versuch die Proben eine Länge von 100mm besitzen wird der Abstand der Auflager auf 80mm eingestellt.

Dazu wird geschaut, wie groß der Rollendurchmesser ist. Je nach Durchmesser wird an der dafür vorgesehenen Skala geschaut und die Auflagerabstände eingerichtet.



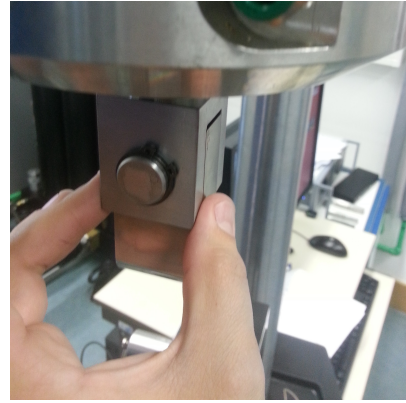
In diesem Fall ist ein Durchmesser von 20mm vorhanden.

Alternativ kann man zum Einrichten der Auflagerabstände eine Vorrichtung nutzen, welche den gewünschten Auflagerabstand besitzt. Mit Hilfe des Stempels kann man diese Vorrichtung auch noch mittig ausrichten.



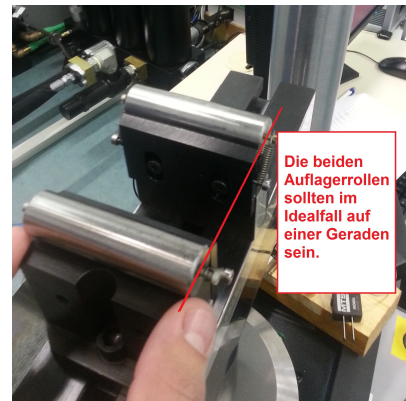
3

Nachdem der Auflagerabstand eingerichtet wurde ist es nun wichtig, dass der Stempel gerade in der Einspannung sitzt. Eine Schräglage würde die Probe falsch belasten und somit das Ergebnis verfälschen.



4

Ebenso wichtig ist es die Auflager gleichmäßig auszurichten. Sie sollten im Idealfall auf einer Geraden liegen und bündig abschließen.



5

Nun können die benötigten Geräte eingeschaltet werden.

Siehe dazu Kapitel 2.3
[Punkt 1-10]

2.3. Einschalten der benötigten Geräte

Bevor die MTS Landmark in Betrieb genommen werden kann ist es wichtig, dass eine gewisse Reihenfolge beim Einschalten der Geräte eingehalten werden muss.

①

Zu Beginn ist es wichtig den Strom einzuschalten.

Dazu wird der Hauptschalter direkt neben der Eingangstür von 0 auf I umgelegt.



②

Anschließend wird die Kühlwasseranlage eingeschaltet, damit die MTS Landmark die nötige Kühlung bekommt.

Ein rotes Aufleuchten signalisiert, dass die Kühlung eingeschaltet ist.

Der Schalter befindet sich hinten rechts im Raum.



③

Nun wird die Stromzufuhr für den Computer eingeschaltet.

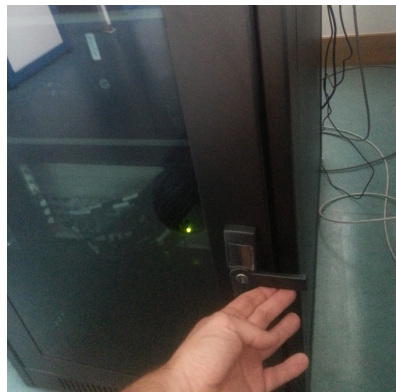
Der Schalter dafür befindet sich im ersten Raum hinter dem Serverschrank und der großen Prüfmaschine.



④


Jetzt wird der Serverschrank geöffnet.

Dazu wird der Hebel um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedreht.



5

Nachdem der Schrank geöffnet wurde, werden die zwei darin befindlichen Geräte eingeschaltet.

Zuerst wird das obere Gerät eingeschaltet. Dazu muss gewartet werden, bis das Display 'Press  to Start' anzeigt.

Zum Einschalten muss dieser Knopf ca. 2 Sekunden lang gedrückt werden. Es ertönt ein Signal, welches das Hochfahren bestätigt.

Anschließend wird der Computer hochgefahren.

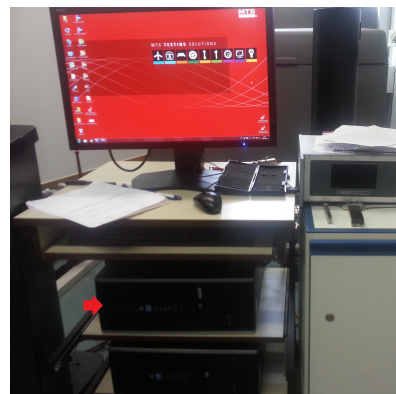
Benutzer: MTS
Passwort: mts



Nun geht es in den zweiten Raum in der die kleine Prüfmaschine steht.

Dort schalten Sie den oberen Computer ein.

Benutzer: MTS
Passwort: mts

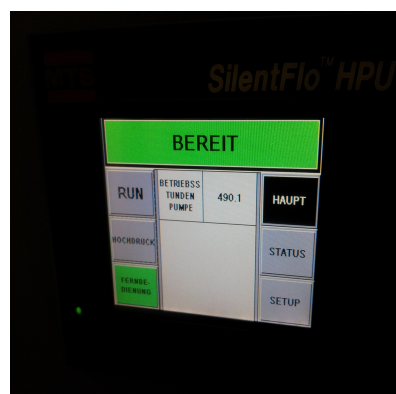


6

Zu guter Letzt muss überprüft werden, ob denn die nötigen Ventile geöffnet sind und ob auch die Hydraulik einsatzbereit ist.

Deshalb wird zuerst überprüft, ob die Hydraulik **Bereit** ist.

Dazu einmal auf das Display mit dem Finger (Touchscreen) drücken und den Status überprüfen.

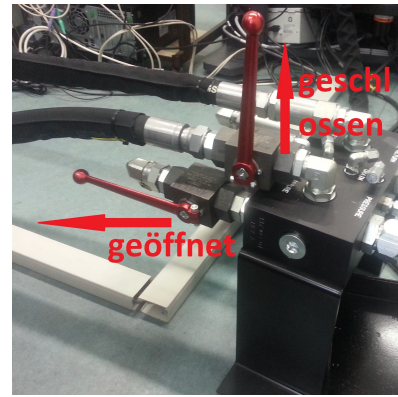


7

Als nächstes wird überprüft, ob das Ventil für die kleine Prüfmaschine geöffnet ist.

Dazu wird das untere Ventil in Horizontallage gebracht.

Das obere Ventil ist für die große Prüfmaschine und somit nicht relevant für den Versuch.



8

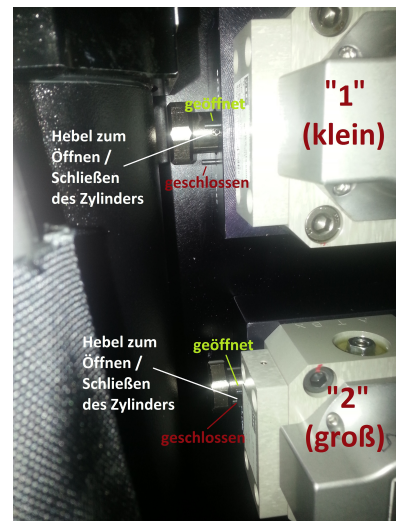
Anschließend wird die Öl - Durchflussmenge eingestellt.

Zylinder 1: 3,8L / min

Zylinder 2: 38 L / min

Für den Versuch wird eine Öldurchflussmenge von 3,8L benötigt.

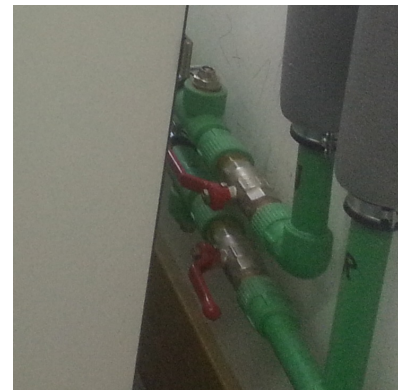
Das bedeutet, der **obere Zylinder muss geöffnet** sein und der **untere geschlossen**.



9

Zu guter Letzt wird überprüft, ob der Zulauf und Rücklauf der Wasserleitungen geöffnet sind.

Dazu müssen beide Hebel sich in Horizontallage befinden. Erst dann kann das kalte Wasser zulaufen und das warme ab - laufen.



2.4. Software starten

Damit die Software korrekt arbeitet und es zu keinerlei Problemen kommt sollten alle Schritte aus Abschnitt 2.3 [Punkt 1-9] abgearbeitet worden sein.

a) Station Manager

Im Station Manager werden die Parameter der Station definiert. Dazu wird eine durch den Station Builder erstellte Konfigurationsdatei geladen, mit der es anschließend möglich ist der zugehörigen Station Parameter, wie z.B. Grenzwerte und Aufnehmerbereiche zu definieren.

Des Weiteren ist es möglich über den Station Manager die Hydraulik (HPU = Hydraulic Power Unit) und den Hydraulikverteiler (HSM = Hydraulic Service Manifold) zuzuschalten, sowie die Bewegung des Zylinders zur Probeneinspannung und Testvorbereitung zu steuern.




Der Station Manager ist das erste Programm, welches gestartet werden muss, da hier die Hardwaregrenzen eingestellt und die Startwerte 'genullt' werden.

- ① Zum Starten des Programms doppelklicken auf die Verknüpfung 'Station Manager' auf dem Desktop.
- ② Es kommt eine Abfrage nach der Konfigurationsdatei, welche geladen werden soll.

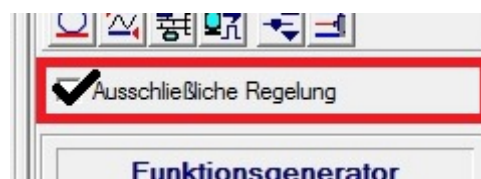
Wähle:

Station 1 COD PD Riss.cfg – mit Interlock 1 & 3,8 L / min

Folgende Fenster müssen nach dem Start angezeigt werden:

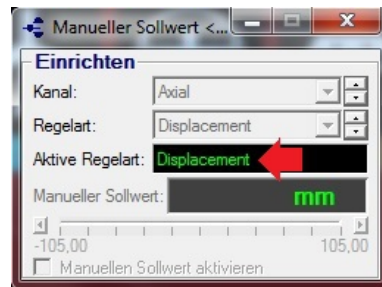
- Hauptfenster
- Detektoren 
- Manueller Sollwert 
- Stationssignale 

- ③ Im Hauptfenster den Haken setzen bei 'Ausschließliche Regelung'.



4

Die Regelart muss 'Displacement' sein. Sollte dies nicht der Fall sein muss über das Fenster 'Manueller Sollwert' die Regelart eingestellt werden. Dazu den Haken bei 'Manuellen Sollwert aktivieren' setzen, Regelart einstellen, Haken wieder entfernen.



5

Unter dem Fenster 'Detektoren' folgende Grenzen setzen:



Einige Grenzwerte müssen zu Beginn 'inaktiv' gesetzt werden, damit im Anschluss die Maschine überhaupt gestartet werden kann.

Auf 'Freigabe' drücken. Der 'Interlock' dürfte nicht mehr rot aufleuchten.

6

Nun wird die Hydraulik Stück für Stück gestartet.

Dazu wird mit einem Niederdruck begonnen.

Kurz warten (ca. 5 Sek) und auf Hochdruck umschalten.



Anschließend wird die HSM, ähnlich wie die HPU gestartet.



7

Haken entfernen bei 'Ausschließliche Regelung' und das Handset (Handsteuerung) aktivieren.



Es kann nun die Probe eingespannt werden.

Siehe dazu Abschnitt 2.5!

b) MTS Test Suite / Multipurpose Elite (MPE)

Mit Multipurpose Elite (MPE) kann man wiederverwendbare Tests erzeugen, die sowohl die Testausführung, als auch die Analyse der Testdaten beinhalten können. Multipurpose Elite ist ein separates Programm, das mit dem Station Manager zusammenarbeitet.

1

Zum Starten des Programms doppelklicken auf die Verknüpfung 'Multipurpose Elite' auf dem Desktop. Der Station Manager muss geöffnet bleiben.

2

Klick auf '**Recents Test**'

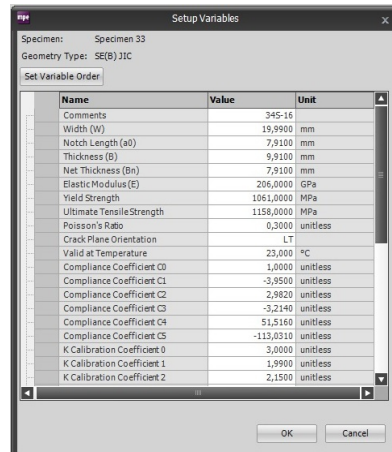
Nun kann per Doppelklick ausgewählt werden, welche Art von Versuch gefahren werden soll. Dazu stehen im Allgemeinen 3 generelle Tests zur Verfügung:

(für statische Tests)	ASTM E 1820 JIC SEB Probe
(für zyklische Tests)	ASTM E 647 SEB Probe COD Polarity 2014
(zur Bestimmung d. Compliance-Koeffizienten)	ASTM E 647 SEB Probe COD Polarity 2014 Markerloadtest

3

Anschließend auf 'New Testrun'.

Es erscheint ein Dialog in dem die Kennwerte der zu untersuchenden Probe eingegeben werden müssen. Siehe auch Kapitel 3.1 bzw. 4.1.



4

Nachdem die Werte eingegeben und mit OK bestätigt wurden öffnet sich ein neuer Dialog, in dem es um die Paramterkonfiguration geht.

Siehe dazu:

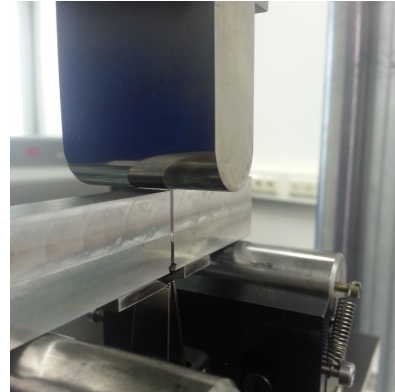
- für statische Proben: Abschnitt 3.1
- für zyklische Proben: Abschnitt 4.1

2.5. Proben einspannen

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie eine Probe eingespannt wird.
Die Probe sollte soweit vorbereitet sein und das COD sollte in der Probe stecken.

① Zu Beginn wird die Probe mit den Messschneiden nach unten auf die Auflager gelegt.

② Anschließend kann die Probe langsam an den Stempel herangefahren werden. Dazu wird der untere Zylinder mittels Drehrad bis kurz vor dem Stempel herangefahren.



Achtung:

Die Probe darf keinen Kontakt mit dem Stempel haben und der Abstand darf nicht größer 10mm sein.
Das Heranfahren erfordert ein wenig Feingefühl.

Es ist möglich die Probe bis auf wenige Millimeter an den Stempel heranzufahren. Dazu sollte man aber im 'Schildkröten-Modus' arbeiten.

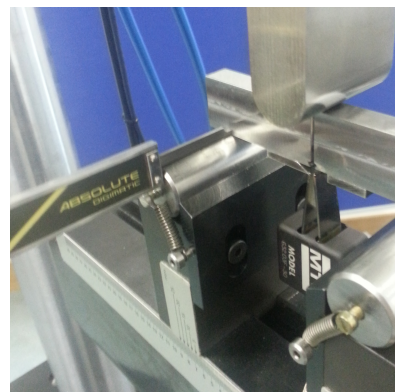
③ Nun wird die Probe mittig ausgerichtet.

Mit Hilfe des Messschiebers kann man einen Anschlag schaffen, sodass man die Mitte sehr schnell eingerichtet hat.

Das Maß für den Anschlag lässt sich aus der Stärke (B=10mm) der Probe und der Länge der Rollen (L=75mm) berechnen.

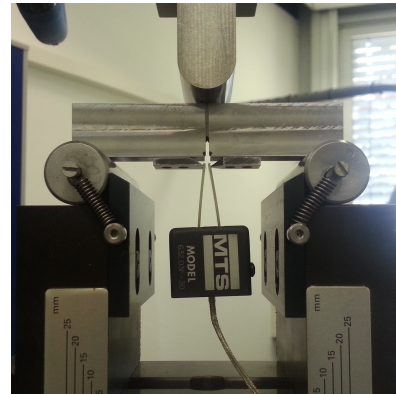
$$\frac{L-B}{2} = 32,5 \text{ mm}$$

Die gegenüberliegende Seite des Messschiebers kann nun als Anschlag verwendet werden.



Des Weiteren muss auch die Mitte der Kerbe genau unter dem Scheitelpunkt des Stempels sein.

Sind alle Punkte erfüllt liegt die Probe mittig auf.



Von hier an heißt es: !!! FINGER WEG !!!

Die Probe wird ab sofort nicht mehr angefasst auch nicht nachdem die Probe eingespannt wurde.

4

Handsteuerung deaktivieren – von Schildkröte auf Hase umstellen – im Station Manager Haken setzen für 'ausschließliche Regelung' und unten auf den Button 'Freigabe' drücken.

Es sollte weder Programlock noch Interlock rot aufleuchten.

5

Nun geht es in das Programm Multipurpose Elite (MPE). In dem Programm wird ein passendes Template ausgewählt (*) und anschließend ein neuer Test durchgeführt.

(*) **Template-Wahl und Parameter:**
siehe auch Kapitel 2.4b & 3.2 bzw. 4.2

Nachdem die Hauptparameter, wie z.B. Probenabmessungen und Koeffizienten eingegeben wurden erscheint das Hauptmenüfenster.

In diesem Fenster ist ein Button mit dem Namen '**Fix Specimen**'. Über diesen Button wird die Probe nun endgültig eingespannt.

Wähle den Button '**Fix Specimen**' und starte den Prozess mit dem RUN Befehl. Dies benötigt etwas Zeit.

Nachdem der Prozess abgeschlossen wurde ist die Probe fixiert und mit einer (wenn auch kleinen) Kraft belastet. Da diese Kraft nicht sehr groß ist, ist abzuraten die Probe anzufassen. Man kann sie nämlich mit etwas Kraftaufwand noch bewegen. Für die Maschine reicht aber diese leichte Fixierung aus.

6

Nun werden im Station Manager im Fenster 'Stationssignale' die Werte für **Axial Displacement** und **COD** mit Hilfe von 'Auto Offset' genullt. Force wird nicht genullt.

7

Anschließend Grenzwerte folgendermaßen einrichten:

The screenshot shows a software window titled 'Detektoren < Station 1 COD PDiss.cfg >'. It has a dropdown menu for 'Liste:' set to 'Alle Detektoren'. Below this is a tabbed interface with 'Grenzwertüberwachung' selected. The table below shows the configured limits and actions for five different sensors.

	Oberer Grenzwert	Obere Aktion	Unterer Grenzwert	Untere Aktion
Axial Displacement:	4,00 mm	Ausschalten und verrie...	-4,00 mm	Ausschalten und verrie...
Axial Force:	10,00 kN	Ausschalten und verrie...	-20,00 kN	Ausschalten und verrie...
Axial COD:	3,9000 mm	Ausschalten und verrie...	-3,9000 mm	Ausschalten und verrie...
Active PD:	13000 mV	Inaktiv	-13000 mV	Inaktiv
ReferencePD:	13000 mV	Inaktiv	-13000 mV	Inaktiv

8

Die Probe ist nun eingespannt und die Hardwaregrenzen wurden im Station Manager ebenfalls eingerichtet. Nun kann der Test fort gefahren werden. Es kann also der Station-Manager wieder minimiert werden und das MPE wieder aufgerufen werden.

2.6. Proben auswerten

Damit die Proben ausgewertet werden können müssen sie zuerst durchgebrochen werden. Dazu wird die Probe noch einmal mittig aufgelegt und mittels Stempel durchgebrochen.

Bevor aber dieser Schritt vollzogen wird bietet es sich an die Proben vorher bei ca. 300°C anzulassen, damit man die Rissfläche von der Bruchfläche unterscheiden kann. Dieser Schritt ist besonders empfehlenswert für statische Versuche. Für zyklische Versuche kann man diesen Schritt überspringen.

Im Folgenden wird erklärt, wie die Probe ausgemessen wird. Es wird davon ausgegangen, dass die Probe bereits vollständig getestet, angelassen und durchgebrochen wurde.

- ① Die Probe wird mittels Stereomikroskop analysiert. Die Einrichtung wurde bereits in Kapitel 2.3. Abschnitt 'Kerbtiefe messen' expliziter darauf eingegangen. Der Unterschied ist, dass dieses Mal die Rissfläche untersucht werden soll und nicht die Kerbtiefe. Dazu wird die Probe hochkant unter das Objektiv gestellt. Anschließend wird die Software für das Stereomikroskop gestartet und das Livebild zugeschaltet. Nun sollte das Stereomikroskop so eingestellt werden, dass man ein klares Bild von der Probe und derer Rissfläche erhält. Beachte auch hierbei wieder die Einstellungen am Stereomikroskop, sowie die Einstellungen in der Software

- Vergrößerungen von '0,7x'
- Objektiv mit der Bezeichnung '1,0x'

- ② Ist alles eingestellt wird nun ein Einzelbild geschossen und im JPEG-Format gespeichert. Dazu ein Klick auf 'Einzelbild' (rechts oben)

Wähle im Menü: 'Datei → Speichern unter...'

In dem darauf folgenden Dialog muss der Speichername, Speicherort und das Format ausgewählt werden. Empfohlen wird das JPEG-Format. Besser wäre das TIF-Format, aber dies bereitete bei meinen Versuchen Problemen.

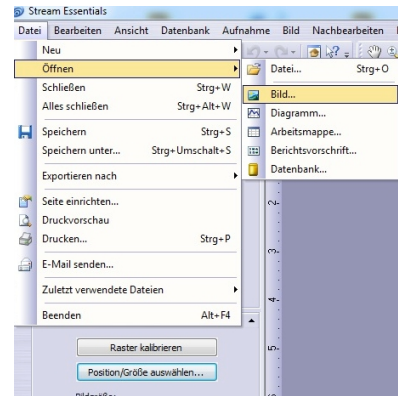
- ③ Für den weiteren Verlauf muss das Bild auf einem Stick gespeichert werden, da ein Programm- und Computerwechsel durchgeführt werden muss. Es wird ein Computer mit der Software 'Stream Essentials' benötigt. Der Computer am Stereomikroskop besitzt nur eine Light-Variante der Software ('Stream **Start** Essentials').

In der Vollversion ist aber eine Funktion vorhanden, die für das Messen notwendig ist.

4

Ist ein Computer mit der Software gefunden wird diese auch direkt gestartet und das zuvor gespeicherte Bild geladen.

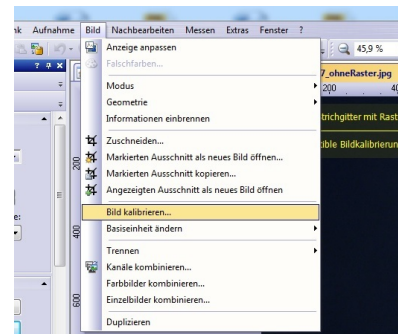
Wähle im Menü:
'Datei → Öffnen → Bild'



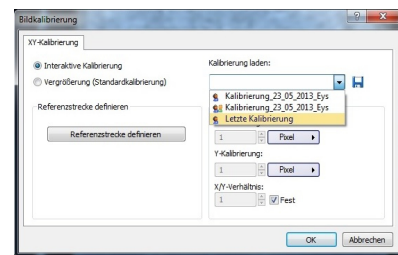
5

Nun muss das geladene Bild erst einmal kalibriert werden, damit beim Messen auch der richtige Maßstab eingestellt ist.

Wähle im Menü:
'Bild → Bild kalibrieren'



Es erscheint ein neuer Dialog. In diesem Dialog wird die 'Letzte Kalibrierung' geladen.

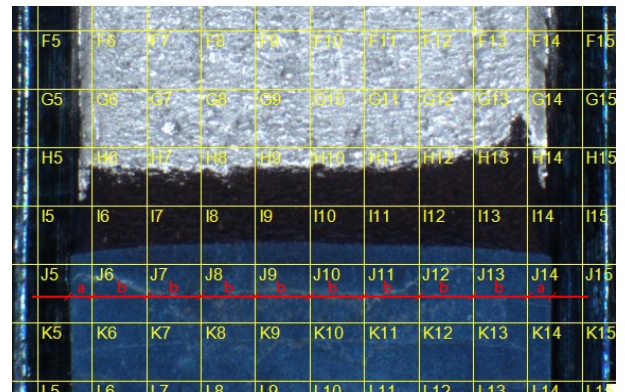


Im Idealfall sollte alles korrekt eingestellt sein. Man sollte dennoch eine Probenmessung mittels einer Linienmessung durchführen, um sicher zu gehen, dass der Maßstab richtig kalibriert wurde. (Menü: Messen → H-Linie)

Ist der Maßstab bzw. die Messung nicht korrekt muss über die X-Y-Kalibrierung dieser angepasst werden. Hilfestellung zur Einrichtung des Maßstabes können die Professoren bzw. das Fachpersonal geben.

6

Als nächstes wird das Strichgitter auf die Probe angepasst. Sollte die Kalibrierung korrekt eingestellt sein muss am Strichgitter nicht mehr viel geändert werden. Es muss lediglich in der X-Achse so verschoben werden, dass die Achsen symmetrisch in der Rissfläche liegen. Dazu wird der Wert X links unter 'Rasterposition' einfach angepasst. Wie das Strichgitter auszusehen hat wird sehr gut in der **ISO FDIS 12135(E)** auf der Seite 26 beschrieben.



7

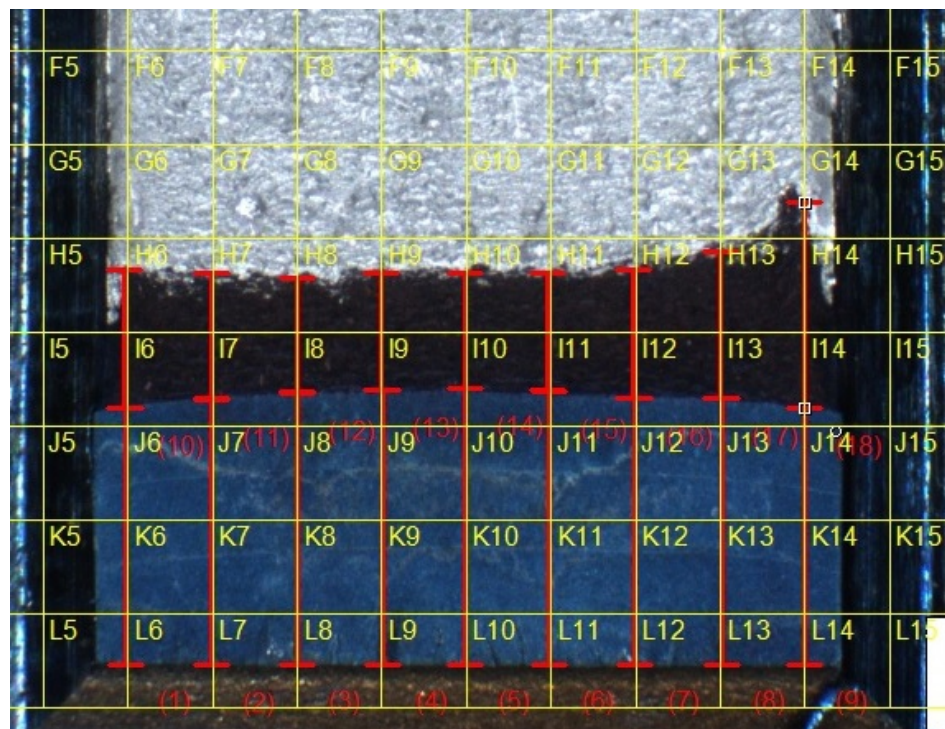
Nun geht es an das Messen der Bruchflächen. Zur Hilfe steht das Messwerkzeug 'Vertikale Linie' unter dem Menüpunkt 'Messen'.

Zu Beginn wird der Precrack ausgemessen. Dazu wird mit Hilfe der vertikalen Linie gemessen. Begonnen wird an der ersten senkrechten Strichgitterlinie. Der Precrack ist auf diesem Bild der blau unterlegte Teil. Gemessen wird also von Anfang der blau unterlegenen Fläche bis hin zum Ende. Dies macht man für jede darauffolgende Strichgitterlinie.

Anschließend wird der statische Rissfortschritt gemessen.

Durch das Anlassen ist sehr gut zu erkennen, wie der Riss voran geschritten ist. Der Riss wird ähnlich wie der Precrack gemessen, nur dass am Ende des Precracks begonnen wird.

Am Ende sollte das Bild in etwa so aussehen:



8

Nun geht es darum die Messwerte zu exportieren. Dafür ist im unteren Teil mittig des Programms eine Leiste die dies ermöglicht.



Leiste zum Exportieren der Werte

Ist diese Leiste nicht sichtbar muss im Hauptfenster oben rechts auf 'Bearbeitet' geklickt werden.

Zum Exportieren der Werte auf das vierte Symbol von rechts klicken. ('Nach Excel exportieren')

Es erscheint ein Excel-Fenster mit sämtlichen Messwerten.

Lösche die Zeilen:

- Anzahl
- Minimum
- Maximum
- Mittelwert

Die Werte sind nicht relevant noch dazu ist der Mittelwert nicht korrekt berechnet.

Dies würde nur für Irritation sorgen, daher werden die Werte gelöscht.

	A	B	C	D	E
1	Typ	Name	Punkt X	Punkt Y	Länge (mm)
2	Vertikale Linie				2.717182
3	Vertikale Linie				2.805611
4	Vertikale Linie				2.877962
5	Vertikale Linie				2.942274
6	Vertikale Linie				2.89404
7	Vertikale Linie				2.837767
8	Vertikale Linie				2.837767
9	Vertikale Linie				2.717182
10	Vertikale Linie				2.910118
11	Vertikale Linie				1.455059
12	Vertikale Linie				1.334474
13	Vertikale Linie				1.221928
14	Vertikale Linie				1.229967
15	Vertikale Linie				1.213889
16	Vertikale Linie				1.246045
17	Vertikale Linie				1.350552
18	Vertikale Linie				1.543488
19	Vertikale Linie				2.186608
20					
21	Anzahl				18
22	Minimum				1.213889
23	Maximum				2.942274
24	Mittelwert				2.128395
25					

Die Berechnung des Mittelwertes wird laut **ISO FDIS 12135(E)** folgendermaßen durchgeführt:

$$a = \frac{1}{8} \left[\left(\frac{a_1 + a_9}{2} + \sum_{j=2}^{j=8} a_j \right) \right]$$

Beachte, dass zwei Berechnungen vorgenommen werden müssen. Zum einen die Berechnung des Mittelwertes für den Precrack. Zum anderen die Berechnung des Mittelwertes für die stabile Rissausbreitung.

9

Messungen in Bild einbrennen.

Wähle im Menü:

'Bild → Informationen einbrennen'

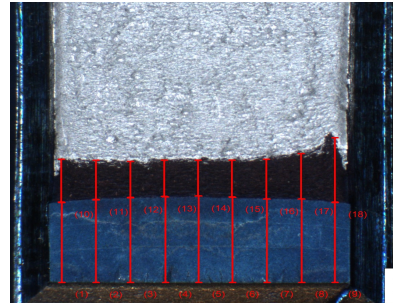
Anschließend auf:

'Datei → Speichern unter...'

Es wird ein Bild erstellt mit den
eingezeichneten Messlinien.

Dies ist wichtig für die anschließende Dokumentation.

Mit Hilfe dieses Bildes kann man nachweisen, wie gemessen wurde.



10

Zu guter Letzt wird die Probe analysiert.

Dafür wird dokumentiert wie sich bspw. der Riss ausgebreitet hat und wie die Rissfläche aussieht und wieviel Kraft dafür notwendig war.

3. Ausführung eines statischen Versuchs

3.1. Template-Wahl & Einführung

Für statische Versuche wird folgendes Template gewählt:

ASTM E 1820 JIC SEB Probe (Steel) [für Stahl] bzw. **(Concrete)** [für Beton]

Es wird anschließend ein neuer Testlauf gestartet. **Als Beispiel dient die Stahlprobe 34S-24.** Die Probe besaß bereits einen Precrack, wodurch die Erklärung eines statischen Versuches in zwei Varianten erklärt wird. Zum einen wird auf Proben ohne Precrack eingegangen, zum anderen auf Proben mit integrierten Precrack.

Ob eine Probe einen Precrack bereits besitzt ist über den zuständigen Professor/Betreuer in Erfahrung zu bringen.

3.2. Parameter

Folgende Parameter wurden für einen Test mit der *Probe 34S-24* gewählt:

Pre-Test Variables (Werkstoffkenngrößen & Koeffizienten)

Name	Wert	Einheit	Bemerkung
Comments	Probe 34S-24	-	Name der Probe
Width (W)	20,01	mm	Weite der Probe
Notch Length (a_0)	8,00	mm	Startrisstiefe a_0
Thickness (B)	10,00	mm	Dicke der Probe
Net Thickness (B_n)	8,00	mm	Nettodicke mit Seitenkerben
Elastic Modulus (E)	206	kN/mm ²	Elastizitätsmodul
Yield Strength	1061,000	kN/mm ²	Streckgrenze
Ultimate Tensile Strength	1158,000	kN/mm ²	Zugfestigkeit
Poisson's Ratio	0,3	-	Querdehnzahl ↗ siehe http://de.wikipedia.org/wiki/Poissonzahl
Valid at Temperature	23	°C	Temperatur
Crack Plane Orientation	LT	-	Lage der Rissebene
Compliance Coefficient C_0	0,9998	-	exp. bestimmt durch 'Markerloadtest'
Compliance Coefficient C_1	-8,9116	-	exp. bestimmt durch 'Markerloadtest'
Compliance Coefficient C_2	85,0010	-	exp. bestimmt durch 'Markerloadtest'
Compliance Coefficient C_3	-655,4000	-	exp. bestimmt durch 'Markerloadtest'
Compliance Coefficient C_4	2372,7000	-	exp. bestimmt durch 'Markerloadtest'
Compliance Coefficient C_5	-3109,4000	-	exp. bestimmt durch 'Markerloadtest'
K Calibration Coefficient 0	3,0000	-	Geometriefkt. für SEB Probe
K Calibration Coefficient 1	1,9900	-	Geometriefkt. für SEB Probe
K Calibration Coefficient 2	2,1500	-	Geometriefkt. für SEB Probe

K Calibration Coefficient 3	-3,9300	-	Geometriefkt. für SEB Probe
K Calibration Coefficient 4	2,7000	-	Geometriefkt. für SEB Probe
CTOD Coefficient 0	3,1800	-	Wert zur Berechnung von CTOD
CTOD Coefficient 1	-4,3200	-	Wert zur Berechnung von CTOD
CTOD Coefficient 2	4,4400	-	Wert zur Berechnung von CTOD
CTOD Coefficient 3	-2,0500	-	Wert zur Berechnung von CTOD
Load Line Compliance Coefficient 0	1,1930	-	Nachgiebigkeit aus Kraft-Durchbiegungs-Kurve
Load Line Compliance Coefficient 1	-1,9800	-	
Load Line Compliance Coefficient 2	4,4780	-	Nachgiebigkeit aus Kraft-Durchbiegungs-Kurve
Load Line Compliance Coefficient 3	-4,4430	-	
Load Line Compliance Coefficient 4	1,7390	-	Nachgiebigkeit aus Kraft-Durchbiegungs-Kurve
Load Line Compliance Coefficient 5	0,0000	-	
Span	80	mm	Auflagerabstand der Rollen

Precrack Parameters

Für meine Tests benötigte ich keine Precrack Parameter zu setzen, da alle Proben bereits einen Precrack besaßen.

Aus diesem Grund verweise ich für Proben **ohne** integrierten Precrack auf die Parameterkonfiguration für **zyklische Tests in Kapitel 4**.

JIC Parameters (Parameter für den statischen Test)

Name	Wert	Einheit	Bemerkung
JIC Control Mode	Displacement Mode		Art der Regelung
Use COD Step Limit	Yes		Zugabe der Last bis eines der Kriterien erfüllt ist: <ul style="list-style-type: none"> • Rissaufweitung = 0,015mm • Belastung = 0,5 kN • Weg der Rampe = 0,015mm
JIC Ramp COD Limit Increment	0,015	mm	
Use Load Step Limit	Yes		
JIC Ramp Load Limit Increment	0,5	kN	
JIC Displacement Increment	0,015	mm	
Crack Propagation Hold Time	20	s	Haltezeit bei Last
Percent of Final Precrack Load	50	%	
JIC Load Ramp Rate	0,5	kN/s	Belastungsrate zu Beginn
JIC Ramp Rate	0,025	mm/s	Geschwindigkeit der Rampe
JIC Number of Unloads	2	mal	Anzahl der Entlastungsprozesse
JIC UnloadMethod	Percentage		Entlastungsmethode (EM)
JIC Absolute Unload	0	kN	Nicht notwendig für diese EM
JIC Percent Unload	20	%	Prozentsatz um den entlastet wird
JIC Reload Rate	0,5	kN/s	erneute Belastungsrate
JIC Unload Rate	0,5	kN/s	Entlastungsrate
JIC Data Frequency	30	Hz	Datenerfassung
JIC Frame Stiffness	260	kN/mm	Steifigkeit

Data Storage Parameters (Parameter zur Datenspeicherung)

Name	Wert	Einheit	Bemerkung
Precrack Cycle Storage Input	100	Zyklen	Daten aus Precrack alle 'x' Zyklen speichern
Precrack Save Percent Limit	0	%	Daten speichern ab 0% Precrack
Lower Least Square Fit	20	%	Erste 20% des JIC Tests werden nicht gemessen
Upper Least Square Fit	80	%	Letzte 20% des JIC Tests werden nicht gemessen

Test Termination Parameters (Beendigungsparameter)

Name	Wert	Einheit	Bemerkung
JIC Max. COD in Use	Yes		
JIC Max. COD	3,5	mm	max. Aufweitung des COD-Clips
JIC Max. Crack Extension in Use	Yes		
JIC Max. Crack Extension	3	mm	max. Risslängenwachstum
JIC Max. Crack Size in Use	Yes		
JIC Max. Crack Size	15	mm	max. Risslänge
JIC Max. Displacement in Use	Yes		
JIC Max. Displacement	3,9	mm	max. Bewegung des Kolbens
JIC Max. Load in Use	Yes		
JIC Max. Load	19	kN	max. Kraft

3.3. Crack Size Check durchführen

Nachdem alle Parameter eingegeben wurden wird zu Beginn ein Crack Size Check durchgeführt, um zu sehen, ob die am Mikroskop gemessene Startrissstiefe mit der, der Maschine übereinstimmt.

Dazu wählen Sie im Hauptmenüfenster 'Crack Size Check' aus und starten über den Button 'Measure Crack Size' den Crack Size Check.

Merke:

Sollte der Test nicht starten wird wahrscheinlich noch ein Programmlock vorhanden sein. Überprüfen Sie die Einstellungen der Maschine. Die Maschine muss für einen Test mit voller Kraft (Symbol 'Hase' auf der Maschine) laufen.

Ist der Test durchgelaufen erscheint ein neues Fenster mit verschiedenen Werten. Da meine Proben bereits einen Precrack besaßen ist es etwas ungewiss, ob die gemessenen Werte korrekt sind oder nicht.

Aus diesem Grund können die Werte nur als 'richtig' angesehen werden, auch wenn diese evtl. vom realen Ergebnis abweichen. Der statische Versuch kann dennoch durchgeführt werden. Allerdings eben mit evtl. falschen Risslängen. Das beeinträchtigt, aber nicht das Endresultat / Endbild des statischen Versuchs.

Da diese Werte nun als 'richtig' angesehen werden muss nun die zuvor eingegebene Risslänge mit der von der Maschine gemessenen Risslänge angeglichen werden. Dazu im Fenster des Crack-Size-Check's unten links auf 'Change Parameters'.

Es wird nun der Wert für 'Entered Crack Size' zur gemessenen Risslänge angepasst. Anschließend wird ein erneuter Crack-Size-Check durchgeführt, damit auch das E-Modul korrekt berechnet wird.

Sollte 'User defined E-Modulus' und 'Calculated Modulus' nahezu identisch sein können nun folgende Werte werden notiert werden:

- Crack Size Maximum Load
- Crack Size Check End Level 1
- Crack Size Measured Crack Size

Diese Schritte sind nur notwendig, wenn bereits ein Precrack vorhanden ist und es ungewiss ist, wie groß die reale Risslänge ist.

Sollte kein Precrack vorhanden sein versucht man die von der Maschine gemessene Risslänge mit der unter dem Mikroskop vorher gemessene Risslänge anzugleichen. (z.B. durch Anpassung des E-Moduls oder Änderung der Compliance-Koeffizienten)

Das E-Modul darf man laut Norm um +/- 10% anpassen.

Merke:

Precrack bereits vorhanden: 'Entered Crack Size' wird 'Measured Crack Size' angepasst.

Precrack nicht vorhanden: 'Measured Crack Size' wird 'Entered Crack Size' angepasst.

3.4. Precrack initiieren

Sollte eine Probe keinen Precrack aufweisen, dann muss erst ein Precrack eingebracht werden. Das bedeutet, dass, nachdem man die Parameter festgelegt hat, man nun auf den Button '**Precrack Specimen**' drückt und über den Befehl RUN den Precrack Vorgang initiiert.

Bei Proben mit Precrack ist dieser Schritt hinfällig. Dennoch benötigt der statische Versuch Kennwerte für den Precrack. Genau da kommen die vorher notierten Werte aus dem Crack-Size-Check ins Spiel. Wie bereits erwähnt gelten diese Werte nur für Proben, welche bereits einen Precrack besitzen.

Somit ist der nächste Schritt auch nur für Proben mit integriertem Precrack notwendig. Bei Proben ohne Precrack ist durch das Ausführen der Funktion 'Precrack Specimen' bereits alle Werte voll automatisch zugewiesen.

Es wird im Hauptmenüfenster der Button 'Assign Precrack Values' angeklickt.

Als Werte trägt man nun folgendes ein:

Name	Wert	Einheit	Bemerkung
Precrack Cycles Completed	0	mal	nicht notwendig
Precrack Final Crack Size	'Wert für Measured Crack Size'	mm	siehe u.a. Crack-Size-Check
Precrack Final P	'Wert für Check End Level 1'	kN	siehe u.a. Crack-Size-Check
Precrack P Maximum	'Wert für Maximum Load'	kN	siehe u.a. Crack-Size-Check
Precrack Final K	15	MPa*√m	Wert für Stahl
Precrack K Maximum	20	MPa*√m	Wert für Stahl
Precrack Comments	'eigene Bemerkungen'		optional

3.5. JIC Test

Der JIC-Test ist das Herzstück des statischen Tests. Erst hier wird eine Probe auf statische Belastungen getestet.

Der Test wird über das Hauptmenüfenster aufgerufen mittels den Button 'JIC Test'. Damit der Test gestartet werden kann ist es zwingend notwendig den Crack-Size-Check drei weitere Male durchzuführen.

Man startet also einen Crack-Size-Check und schließt nach Beendigung das Fenster. Anschließend wiederholt man diesen Vorgang noch zwei weitere Male.

Erst jetzt kann der JIC Test durchgeführt werden.
Gestartet wird er über den RUN Befehl.

Nach dem Start erfährt die Probe eine immer größer werdende statische Belastung. Dieser Vorgang benötigt Zeit. Anhand der Graphen erkennt man sehr gut, wie ein statischer Versuch abläuft.

Nachdem der Test seine vorgegebene maximale Risslänge ($a = 15\text{mm}$) erreicht hat bricht die Maschine den Test ab.

Nun wird die Probe im vorgeheizten Ofen bei 300°C für ca. 10-15 Minuten angelassen. Die Probe sollte nur eine leichte Blaufärbung bekommen.

Ist dieser Vorgang abgeschlossen kann die Probe zerbrochen und anschließend analysiert werden. Es sollte aufgrund des Anlassverfahrens gut zu erkennen sein, wie weit der Riss mittels statischer Belastung gewachsen ist.

Der statische Versuch ist damit abgeschlossen.

Auf der folgenden Seite finden Sie die Auswertung zu meiner Probe 34S-24.

3.6. Auswertung der Probe 34S-24

a) Crack-Size-Check

Am Stereomikroskop wurde eine Kerbtiefe von $a_0 = 8\text{mm}$ gemessen. Da bereits ein Precrack vorhanden ist, ist es ungewiss, wie tief der Anriss bereits ist. Es wird davon ausgegangen, dass der Precrack zwischen 1-2mm größer als der Kerb ist. Ein Crack-Size-Check gibt Aufschluss:

Cycle	Measured Crack Size	Bemerkung
1	9,246	Erste Messung
2	9,22	Zweite (Kontroll-) Messung
3	9,210	Messung um JIC starten zu können
4	9,202	Messung um JIC starten zu können
5	9,207	Messung um JIC starten zu können

b) Precrack

Über 'Assign Precrack Values' wurden die Werte für den Precrack manuell eingefügt.

Folgende Werte wurden übermittelt:

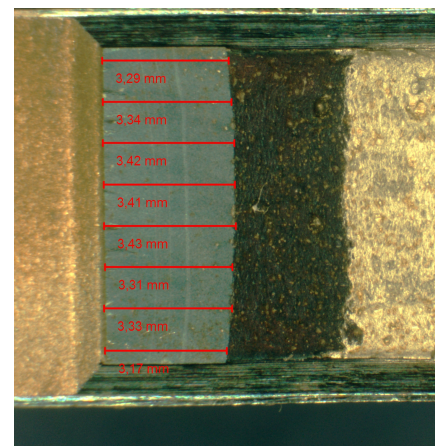
benötigte Zyklen:	0	Zyklen
Precrack Final Crack Size:	9,246	kN
Precrack Final P:	1,23	kN
Precrack P Maximum:		kN
Precrack Final K:	15	Mpa*Vm
Precrack Maximum K:	20	MPa*Vm

Zum Vergleich, ob die Maschine korrekt misst nun noch der Mittelwert der mikroskopischen Messung:

$a_{y1} = 3,29\text{mm}$	$a_{y2} = 3,34\text{mm}$
$a_{y3} = 3,42\text{mm}$	$a_{y4} = 3,41\text{mm}$
$a_{y5} = 3,43\text{mm}$	$a_{y6} = 3,31\text{mm}$
$a_{y7} = 3,33\text{mm}$	$a_{y8} = 3,17\text{mm}$

Mittelwertberechnung:

$$a = \frac{1}{7} \left[\left(\frac{a_{y1} + a_{y8}}{2} + \sum_{j=2}^{j=7} a_{yj} \right) \right] = 3,35\text{ mm}$$



Fazit:

Der CrackSizeCheck gab eine Risslänge von 9,24 mm aus. Dabei ist in Wirklichkeit eine Risslänge von ca. 11,35 mm vorhanden. Der CrackSizeCheck muss also für die nächste Probe noch angepasst werden.

c) JIC-Test

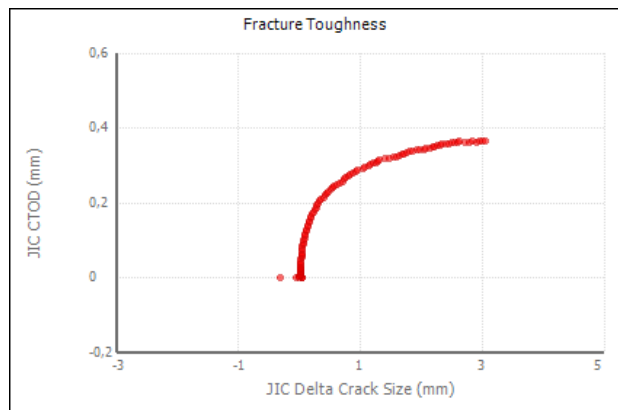
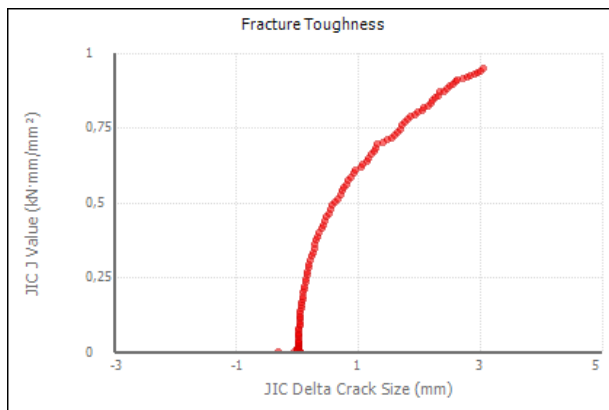
Da dieser Test eine große Menge an Daten erfasst wird übersichtlicher der JIC-Test zusammengefasst werden.

Dieser Test sollte den Riss um 3mm erweitern und anschließend den Test automatisch beenden.

Am Ende des Tests wurde die Probe zerbrochen und mikroskopisch ausgemessen. Anschließend wurden die Risslängen aus der Maschine mit den realen Ergebnissen verglichen.

Für 3mm Rissfortschritt wurden folgende Werte ermittelt:

JIC Step Count:	109	Messungen	
Maximum Load:	11,85	kN	(bei StepCount 51)
Final Load:	6,12	kN	(bei StepCount 109)
Delta Crack Size:	3,043	mm	
Final Crack Size:	12,25	mm	(laut JIC Test)

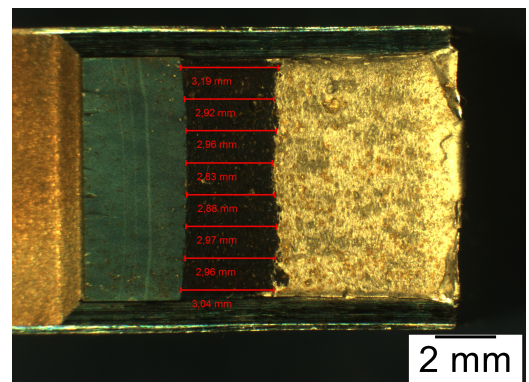


Nachdem die Probe das Risswachstumslimit erreicht hat wurde sie angelassen, abgeschreckt und zerbrochen und mittels Stereomikroskop ausgemessen:

$a_{y1} = 3,19\text{mm}$	$a_{y2} = 2,92\text{mm}$
$a_{y3} = 2,96\text{mm}$	$a_{y4} = 2,83\text{mm}$
$a_{y5} = 2,88\text{mm}$	$a_{y6} = 2,97\text{mm}$
$a_{y7} = 2,96\text{mm}$	$a_{y8} = 3,04\text{mm}$

Mittelwertberechnung:

$$a = \frac{1}{7} \left[\left(\frac{a_{y1} + a_{y8}}{2} + \sum_{j=2}^{j=7} a_{yj} \right) \right] = 2,95 \text{ mm}$$



Fazit:

Die Maschine misst das Δa nahezu perfekt.

Gesamtfazit:

Die Messung von Δa ist soweit korrekt, doch die Messung der Startrisstiefe muss noch angepasst werden. Eventuell bringt die Anpassung des E-Moduls oder die Veränderung von dem Koeffizienten C_0 das gewünschte Resultat.

4. Ausführen eines zyklischen Versuchs

4.1. Template-Wahl & Einführung

Für zyklische Versuche wird folgendes Template gewählt:

ASTM E 647 SEB Probe COD Polarity 2014

Die Ausführung eines zyklischen Versuches wird anhand eines **Beispiels (Probe 34Z-6)** näher gebracht.

4.2. Parameter

Folgende Parameter wurden für einen Test mit der *Probe 34Z-6* gewählt:

Pre-Test Variables (Werkstoffkenngrößen & Koeffizienten)

Name	Wert	Einheit	Bemerkung
Comments	Probe 34Z-6	-	Name der Probe
Width (W)	20,00	mm	Weite der Probe
Notch Length (a_0)	1,93	mm	Startrisstiefe a_0
Thickness (B)	9,99	mm	Dicke der Probe
Net Thickness (B_n)	9,99	mm	Nettodicke der Probe
Elastic Modulus (E)	206	kN/mm ²	Elastizitätsmodul
Yield Strength	1,016	kN/mm ²	Streckgrenze
Ultimate Tensile Strength	1,158	kN/mm ²	Zugfestigkeit
Notch Height	1,5	mm	Breite der Kerbe
Poisson's Ratio	0,3	-	Querdehnzahl ↗ siehe http://de.wikipedia.org/wiki/Poissonzahl
Valid at Temperature	23	°C	Temperatur
Crack Plane Orientation	LT	-	Lage der Rissebene
Compliance Coefficient C_0	0,9998	-	Bestimmt durch 'Markerloadtest'
Compliance Coefficient C_1	-8,9116	-	Bestimmt durch 'Markerloadtest'
Compliance Coefficient C_2	85,0010	-	Bestimmt durch 'Markerloadtest'
Compliance Coefficient C_3	-655,4000	-	Bestimmt durch 'Markerloadtest'
Compliance Coefficient C_4	2372,7000	-	Bestimmt durch 'Markerloadtest'
Compliance Coefficient C_5	-3109,4000	-	Bestimmt durch 'Markerloadtest'
K Calibration Coefficient 0	3,0000	-	Geometriefkt. für SEB Probe
K Calibration Coefficient 1	1,9900	-	Geometriefkt. für SEB Probe
K Calibration Coefficient 2	2,1500	-	Geometriefkt. für SEB Probe
K Calibration Coefficient 3	-3,9300	-	Geometriefkt. für SEB Probe
K Calibration Coefficient 4	2,7000	-	Geometriefkt. für SEB Probe
Span	80	mm	Auflagerabstand der Rollen

Precrack Parameters

Name	Wert	Einheit	Bemerkung
Precrack Wave Shape	True Sine Tapered		Kurvenform (Sinuskurve)
Precrack Final Crack Limit (a_p)	4,0000	mm	$a_p = a_0 + \sim 2\text{mm}$
Precrack Frequency	20,0000	Hz	Anzahl Schwingspiele pro Sekunde
Precrack Load Ratio	0,1000	-	Kraftverhältnis
Precrack Lower Least Square Fit	10	%	Erste 10% des Precracks werden nicht gemessen
Precrack Upper Least Square Fit	90	%	Letzte 10% des Precracks werden nicht gemessen
Precrack Cycle Limit	1 000 000	Zyklen	Limit für die Anzahl der Zyklen
Precrack Final Maximum K_{\max} *	0,6	kN/mm ^{1,5}	Maximale Kraft am Ende des Precracks

*Der Wert für K_{\max} gibt gleichzeitig an, wie viel Kraft für den Crack-Size-Check genutzt werden soll

FCG Parameters (Parameter für den zyklischen Test)

Name	Wert	Einheit	Bemerkung
Control Mode	Delta K	-	Art der Regelung
FCG Load Ratio R	0,1	-	Kraftverhältnis
FCG Delta K Initial	0,5400	kN/mm ^{1,5}	Berechnet aus K_{\max} ($\Delta K = R * K_{\max}$)
Normalized K Gradient	0	1/mm	Abstufung von K pro mm
FCG Frequency	20	Hz	Schwingspiele pro Sekunde
FCG Wave Shape	True Sine Tapered	-	Form der Kurve (Sinuskurve)

Data Storage Parameters (Parameter zur Datenspeicherung)

Name	Wert	Einheit	Bemerkung
Precrack Save Percent Limit	0	%	Speichern starten von Beginn
Store every Nth Precrack Cycle	100	Zyklen	Daten aus Precrack alle 'x' Zyklen speichern
FCG Lower Least Square Fit	10	%	Erste 10% des FCG Tests werden nicht gemessen
FCG Upper Least Square Fit	90	%	Letzte 10% des FCG Tests werden nicht gemessen
Store every Nth FCG Cycle	2000	Zyklen	Daten aus FCG-Test alle 'x' Zyklen speichern

Test Termination Parameters (Beendigungsparameter)

Name	Wert	Einheit	Bemerkung
FCG Final Crack Limit	15	mm	vorgegebene Endrisstiefe
FCG Crack Growth Rate (CGR)	1,00E-002	mm/Zyklus	Maximale Risswachstumsrate
Outside Crack Growth Rate	3	mal	Anzahl der Überschreitungen CGR
FCG Cycle Limit	10 000 000	Zyklen	Anzahl der Zyklen

4.3. Crack Size Check durchführen

Nachdem alle Parameter eingegeben wurden wird zu Beginn ein Crack Size Check durchgeführt, um zu sehen, ob die von uns gemessene Startrisstiefe mit der, der Maschine übereinstimmt.

Dazu wählen Sie im Hauptmenü 'Crack Size Check' aus und starten über den Button 'Measure Crack Size' den Crack Size Check.

Merke:

Sollte der Test fehlschlagen wird wahrscheinlich noch ein Inter- oder Programlock vorhanden sein. Überprüfen Sie die Einstellungen der Maschine. Die Maschine muss für einen Test mit voller Kraft (Symbol 'Hase' auf der Maschine) laufen.

Merke:

In den Precrack Parameters war die Angabe für K_{max} nötig. Dieser Wert K_{max} ist nicht nur für den Precrack zuständig, sondern regelt auch die Kraft für einen Crack-Size-Check. Beachten Sie, dass K_{max} für den vorhandenen Werkstoff angemessen scheint und die Probe nicht direkt bei dem Crack-Size-Check zerbricht.

Nachdem der Crack-Size-Check durchgelaufen ist erscheint ein neues Fenster mit einem Wert X für 'Measured Crack Size'. Dieser sollte im Idealfall identisch mit dem Wert für 'Entered Crack Size' sein.

Ist dies nicht der Fall erlaubt es die Norm den Wert für das Elastizitätsmodul um +/- 10% zu verändern.

Für die Probe 34Z-6 mit einer Startrisstiefe von $a_0 = 1,93$ mm erhielt ich eine gemessene Risslänge von 1,88mm. Daraufhin erhöhte ich das E-Modul um ca. 7% und erhielt im Nachhinein eine gemessene Risslänge von exakt 1,93mm.

Da die Maschine nun korrekt eingestellt wurde ist es möglich den Precrack in die Probe zu bringen.

4.4. Precrack initiieren

In der Parameterkonfiguration wurde bereits das Limit für den Precrack mit $a_0 + 2$ mm angegeben. Dies bedeutet für meine Probe mit einem $a_0 = 1,93$ mm benötigte ich einen Precrack von rund $a_p = 4$ mm

Der Precrack wird einfach über den Button 'Precrack Specimen' und anschließendem 'RUN' Befehl initiiert. Nachdem die 4mm erreicht wurden beendet die Maschine automatisch ihre Arbeit.

Es geht über zum eigentlichen zyklischen Test.

4.5. FCG Test – Fatigue Crack Growth Test

Der FCG-Test ist das Herzstück der zyklischen Tests. Erst hier wird eine Probe auf zyklische Belastungen getestet.

Dafür gibt es zwei verschiedene Varianten. Zum einen über eine konstante Kraft oder (wie bereits in der Konfiguration angegeben) über eine ΔK Regelung.

Der Test wird ebenfalls, wie der Precrack über den RUN Befehl ausgeführt.

Anschließend durchläuft die Probe viele zyklische Phasen, welche wiederum Zeit benötigen.

Da dies ein sehr langwieriger Prozess ist, ist es aber auch sehr schön zu beobachten, wie der Riss stetig größer wird. Sollte man schon einmal einen statischen Test durchgeführt haben, so sieht man auch, wie wenig Kraft für eine zyklische Belastung im Vergleich notwendig ist, um einen Riss wachsen zu lassen.

Nachdem der Test seine vorgegebene maximale Risslänge ($a = 15\text{mm}$) erreicht hat bricht die Maschine den Test ab.

Der zyklische Versuch ist damit abgeschlossen.

Die Probe kann komplett zerbrochen und anschließend analysiert werden.

Auf der folgenden Seite finden Sie die Auswertung zu meiner Probe 34Z-6.

4.6. Auswertung der Probe 34Z-6

a) Crack-Size-Check

Am Stereomikroskop wurde eine Kerbtiefe von $a_0 = 1,93\text{mm}$ gemessen. Es wird durch Anpassen des E-Moduls versucht die korrekte Startrissstiefe zu erreichen. Ebenfalls wurden nach dem Precrack und dem FCG-Test weitere Crack-Size-Checks gemacht, um die von der Maschine gemessenen Werte mit den realen zu vergleichen.

Cycle	Measured Crack Size	Bemerkung
1	1,882	Erste Messung
2	1,888	Zweite (Kontroll-) Messung
3	1,922	E-Modul angepasst
4	1,930	E-Modul weiter angepasst
62269	3,993	Precrack gemessen
212130	16,379	Letzte Messung (nach FCG Test)

b) Precrack

Nachdem der Crack-Size-Check die richtige Startrissstiefe ermittelt hat wurde ein Precrack gestartet. Die Gesamtrisslänge soll nach diesem Vorgang 4mm betragen.

Für 4mm Risstiefe wurden folgende Werte ermittelt:

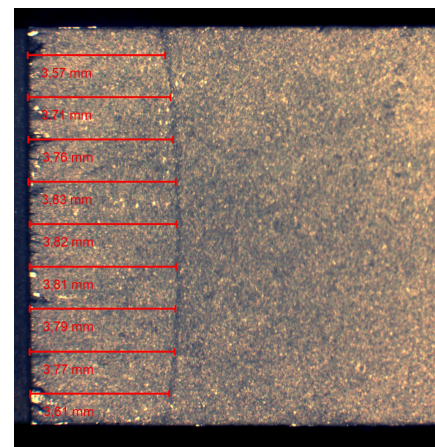
benötigte Zyklen:	62267	Zyklen
Maximum Load:	5,709	kN
Maximum K:	0,6	$\text{kN/mm}^{1,5}$
Precrack Crack Size:	4,00	mm

Zum Vergleich, ob die Maschine korrekt misst nun noch der Mittelwert der mikroskopischen Messung:

$$\begin{aligned}
 a_{y1} &= 3,57\text{mm} & a_{y2} &= 3,71\text{mm} \\
 a_{y3} &= 3,76\text{mm} & a_{y4} &= 3,83\text{mm} \\
 a_{y5} &= 3,82\text{mm} & a_{y6} &= 3,81\text{mm} \\
 a_{y7} &= 3,79\text{mm} & a_{y8} &= 3,77\text{mm} \\
 a_{y9} &= 3,61\text{mm}
 \end{aligned}$$

Mittelwertberechnung:

$$a = \frac{1}{8} \left[\left(\frac{a_{y1} + a_{y9}}{2} + \sum_{j=2}^{j=8} a_{yj} \right) \right] = 3,76 \text{ mm}$$



Fazit:

Die Maschine misst nahezu perfekt. Die Abweichung ist nur sehr gering.

c) FCG-Test

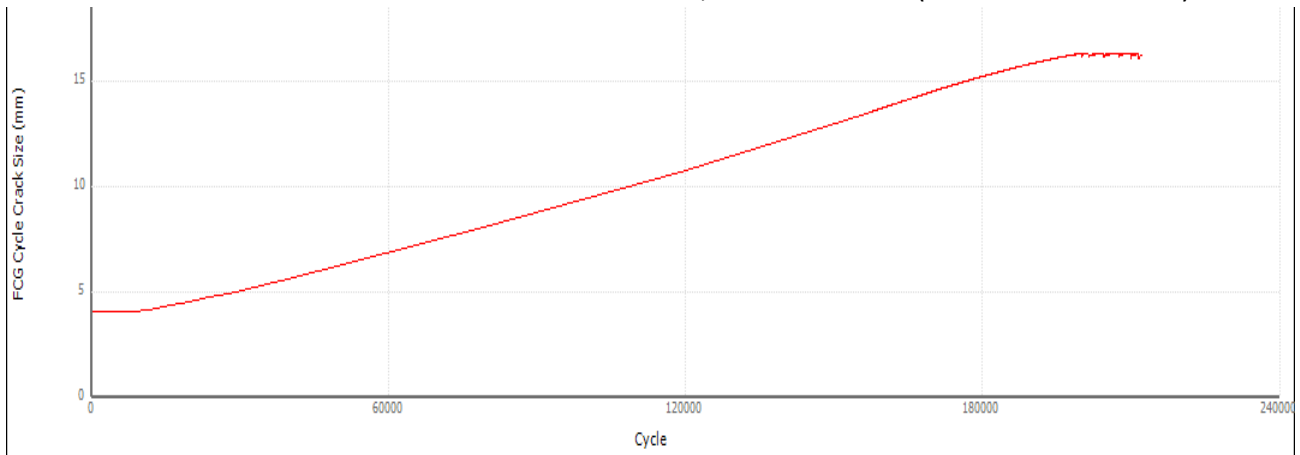
Da dieser Test eine große Menge an Daten erfasst muss übersichtlicher der FCG-Test zusammengefasst werden.

Gestartet wurde der Test bei einem Anriss von 4mm und wurde von der Maschine automatisch bei 16mm beendet.

Am Ende des Tests wurde die Probe zerbrochen und mikroskopisch ausgemessen. Anschließend wurden die Risslängen aus der Maschine mit den realen Ergebnissen verglichen.

Für 16mm Risstiefe wurden folgende Werte ermittelt:

benötigte Zyklen:	212129	Zyklen
Maximum Load:	5,668	kN
Maximum K:	0,6	kN/mm ^{1,5}
Delta K:	0,54	kN/mm ^{1,5}
Final Crack Size:	16,00	mm (laut FCG Test)
Final Crack Size:	16,37	mm (laut CrackSizeCheck)



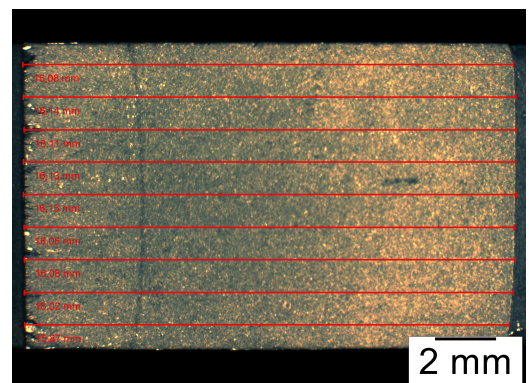
Nachdem die Probe ihre Endrisslänge erreicht hat wurde sie zerbrochen und mittel Stereomikroskop ausgemessen:

Zum Vergleich, ob die Maschine korrekt misst nun noch der Mittelwert der mikroskopischen Messung:

$a_{y1} = 16,08\text{mm}$	$a_{y2} = 16,14\text{mm}$
$a_{y3} = 16,11\text{mm}$	$a_{y4} = 16,13\text{mm}$
$a_{y5} = 16,15\text{mm}$	$a_{y6} = 16,06\text{mm}$
$a_{y7} = 16,08\text{mm}$	$a_{y8} = 16,02\text{mm}$
$a_{y9} = 15,87\text{mm}$	

Mittelwertberechnung:

$$a = \frac{1}{8} \left[\left(\frac{a_{y1} + a_{y9}}{2} + \sum_{j=2}^8 a_{yj} \right) \right] = 16,08 \text{ mm}$$



Fazit:

Die Maschine misst nahezu perfekt. Die Abweichung ist nur sehr gering. Die Einstellungen für die Maschine wurden also korrekt vorgenommen.

5. Vergleich zwischen zyklischer und statischer Probe

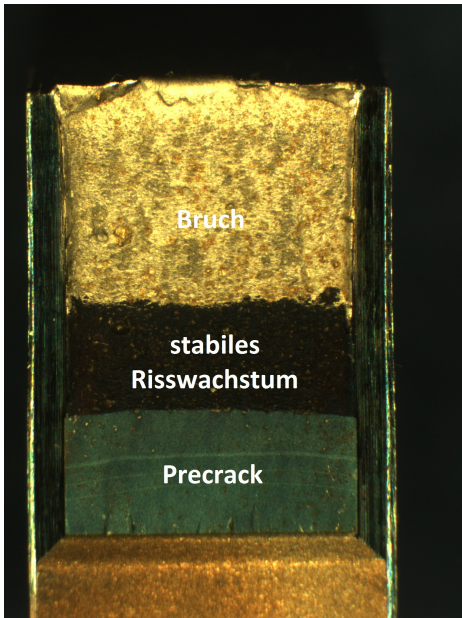

5.1. Einführung

Damit man ein besseres Bild bekommt, was denn nun die Unterschiede sind zwischen einem statischen und einem zyklischen Versuch sind, werde ich die beiden Endresultate aus den jeweiligen Tests vergleichen.

Zum Vergleich werden die Proben 34S-24 (für den statischen Versuch) und 34Z-6 (für den zyklischen Versuch) herangezogen.

Bei diesem Vergleich wird lediglich auf das Endresultat eingegangen und nicht auf die unterschiedlichen Vorgehensweisen der beiden Tests.

5.2. Vergleich zwischen den Proben

	Probe 34S-24	Probe 34Z-6
Bild		
Breite	10,00 mm	9,99 mm
Weite	20,01 mm	20,00 mm
Startrisstiefe	8,00 mm	1,93 mm
Belastungsart	statisch	zyklisch
Maximale Kraft	11,85 kN	5,5 kN
Precrack	glatt	glatt
Risssoberfläche	körnige Oberfläche	glatte Oberfläche
Bruchfläche	kristalline Bruchfläche	kristalline Bruchfläche

5.3. Fazit

Bei der Gegenüberstellung der beiden Proben ist auf dem ersten Blick festzustellen, dass die beiden Proben sich in ihrer unterschiedlichen Rissoberfläche unterscheiden. Während die statische Probe ein körniges Risswachstum aufweist hat die Probe aus dem zyklischen Versuch eine glatte Oberfläche.

Doch der größte Unterschied ist, dass Proben, die statisch belastet werden mehr Kraft benötigen, um einen Riss wachsen zu lassen, als Proben die zyklisch belastet werden. So benötigte man für die statische Probe eine Kraft von 11,85kN bei einer Startrisstiefe von rund 8mm um den Riss wachsen zu lassen.

Bei der zyklischen Probe hingegen werden nur 5,5kN und das bei einer Startrisstiefe von rund 2mm genutzt.

Es ist damit gezeigt, wie gefährlich zyklische Belastungen im Vergleich zu statischen Belastungen ist.

6. Fehlerquellen & Fehleranalyse

6.1. Einführung

Beim Testen von Proben auf zyklische und statische Belastung kann es durchaus zu technischen Problemen kommen. Diese Probleme wirken sich auf die Messergebnisse aus. Ebenso kann es aber auch zu allgemeinen Messfehlern kommen. Diese können einerseits durch die Maschine, sowie durch den Menschen selber entstanden sein.

Dieses Kapitel dient dazu einige dieser Fehler deuten zu können.

6.2. Vom Menschen verursachte Fehler

Folgende Fehler könnten entstehen:

auftretender Fehler	Ursache
ungenauere Berechnung der Risstiefe	<ul style="list-style-type: none">• Ungenaueres Messen der Probenabmessungen• Falsches E-Modul zugewiesen• Auflagerabstand ungenau• Fehler bei der Eingabe der Compliance-Koeffizienten• Die Auflager könnten verdeckt sein
Programm wirkt instabil → Graph ist instabil Messwerte werden dadurch unbrauchbar Eventuell lösen sich die Messschneiden vom Werkstoff ➤ Es wird empfohlen das Programm zu stoppen	<ul style="list-style-type: none">• Messschneiden schief aufgeklebt• Zu wenig Kleber für die Messschneiden verwendet

6.3. Von der Maschine verursachte Fehler

Folgende Fehler könnten entstehen:

auftretender Fehler	Ursache
Maschine startet nicht	<ul style="list-style-type: none"> • Überprüfe die Grenzen der Maschine • Programlock überprüfen – ist von Schildkröte auf Hase umgestellt worden?
Hydraulik startet nicht / plötzlich ausgegangen	<ul style="list-style-type: none"> • Interlock überprüfen • Hydraulik überhitzt – Wasserkühlung überprüfen • Fernbedienung der Hydraulik deaktiviert • generelles Hydraulikproblem – siehe dazu Bedienfeld an Hydraulik
Hydraulik überhitzt trotz Wasserkühlung	<ul style="list-style-type: none"> • Der nötige Wasserdruck ist nicht ausreichend – bitte Professor konsultieren • Es liegt in Wirklichkeit keine Wasserkühlung an, trotz rotem Signallicht • Ventil für den Zu / Ablauf des Wassers geschlossen
Rampe bewegt sich nicht / kein Öl-Zufluss	<ul style="list-style-type: none"> • alle benötigten Ventile überprüfen
Messergebnisse ungenau	<ul style="list-style-type: none"> • Ursache ist noch unbekannt Es stellte sich aber heraus, dass speziell am Anfang die Ergebnisse ungenau sein können. Wahrscheinlich muss das Programm sich erst ein wenig 'einpendeln'. <p>Siehe Anhang (Markerloadtest) – selbes Phänomen</p>

7. Quellenverzeichnis & Glossar

7.1. Glossar

Da das Thema Bruchmechanik und insbesondere die Bedienung der MTS Landmark für viele absolutes Neuland ist wurde ein Glossar erstellt, der den ein oder anderen Begriff näher bringt. Der Glossar soll als Nachschlagewerk, für die in dieser Anleitung verwendeten Begriffe, dienen.

Auf einige Begriffe (z.B. Parameternamen) wurde verzichtet, da sie bereits innerhalb dieser Anleitung erklärt wurden.

Axial

:: beschreibt die Bewegung entlang einer Achse

Auto-Offset

:: ist eine Funktion zum 'Nullen' der Werte mittels Kompensation der Urzustandswerte

COD

:: Abk. für Crack-Opening-Displacement
Beschreibt die Rissaufweitung

Compliance-Koeffizienten

:: experimentell bestimmbare Werte dienen zur Berechnung der Risstiefe

Crack-Size-Check

:: eine Methode zum Prüfen der Risstiefe

CTOD

:: Abk. für Crack-Tip-Opening-Displacement
Beschreibt die Rissaufweitung an der Spitze der Kerbe

Displacement

:: beschreibt die Verschiebung der Rampe in axialer Richtung

FCG-Test

:: Ausführen eines zyklischen Tests

Force

:: Kraft

Markerloadtest

:: Verfahren zum Bestimmen der Compliance-Koeffizienten

Hardwaregrenzen

:: erlaubte Maximalwerte (Limits), die im Station-Manager gesetzt wurden

Hase

:: eine Bezeichnung für den Betriebsmodus (volle Kraft)

aktivieren um Tests durchführen zu können

HPU

:: Abk. für High-Pressure-Unit
(deutsch: Hochdruck-Einheit)
Bezeichnung für die Hydraulikanlage

HSM

:: Abk. für Hydraulic-Service-Manifold
zuständig für die Verteilung des Hydrauliksystems

Interlock

:: eine Sperre aufgrund Erreichen von Hardwaregrenzen. Hydraulik ist dadurch nicht einschaltbar

JIC-Test

:: Ausführen eines statischen Tests

Kerbe

:: mechanisch eingebrachte Kerbe
oft als "Riss"-tiefe a_0 bezeichnet

Load Ratio R

:: Lastregelung / Lastverhältnis

Markerloads

:: sichtbare linienartige Struktur auf der Probenoberfläche

Multipurpose-Elite (MPE)

:: TestSuite / Software zum Durchführen von statischen und Versuchen

Precrack

:: ist ein Anriss, der aufgrund von Belastung entstanden ist

Programlock / Programm 1

:: eine Sperre aufgrund falschem Betriebsmodus (Stichwort: Schildkröte).

Software kann Test dadurch nicht starten

Rampe

:: durch Öldruck beweglicher Zylinder

Recent Tests

:: zuletzt verwendete Tests

Schildkröte

:: eine Bezeichnung für den Betriebsmodus (wenig Kraft)

empfohlen zur Probeneinspannung

Softwaregrenzen

:: erlaubte Maximalwerte (Limits), die in der Software MPE während der Parameterkonfiguration gesetzt wurden

Spannungsintensitätsfaktor K

:: Maß für die Intensität eines Spannungsfeldes in der Nähe einer Risspitze

statisch

:: Art und Weise der Probenbelastung

Station-Manager

:: Software zum Bedienen der Hydraulik und der Maschine

Stereomikroskop

:: Hilfsmittel zur Messung der optischen Risstiefe

Template

:: vorkonfigurierter Test ausgerichtet auf verschiedenste Versuche

 u_x

:: Wert zur Berechnung der Risstiefe

zyklisch

:: Art und Weise der Probenbelastung

7.2. Quellenverzeichnis

Anbei meine verwendeten Quellen

verwendete Links:

www.mts.com

- 10.12.2014 | 13:30 Uhr

www.mts.com/en/about/sensors/index.htm

www.mts.com/en/about/Test/index.htm

<http://de.wikipedia.org/wiki/Bruchmechanik>

- 10.12.2014 | 16:30 Uhr

<http://de.wikipedia.org/wiki/Spannungsintensit%C3%A4tsfaktor>

- 10.12.2014 | 16:30 Uhr

<http://de.wikipedia.org/wiki/Poissonzahl>

- 05.12.2014 | 14:00 Uhr

verwendete Normen / Literatur:

ISO FDIS 12135(E)

E647-05

Skript zum Thema Bruchmechanik von Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner

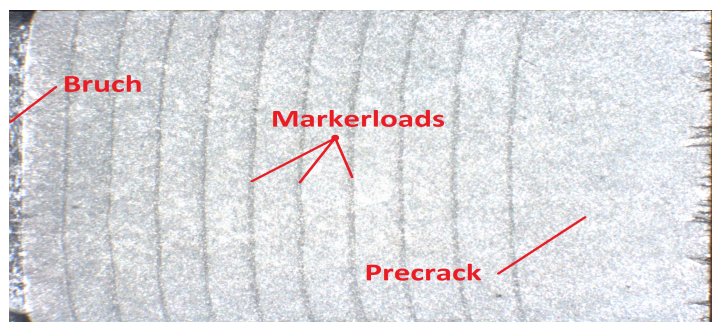
8. Anhang I - Markerloadtest

8.1. Definition – Was ist ein Markerloadtest?

Bevor ein Test durchgeführt werden kann muss zu Beginn die Maschine in Abhängigkeit zur Probe kalibriert werden. Diese Kalibrierung erfolgt neben den Parametereinstellungen auch über die Anpassung der Compliance-Koeffizienten. Sind diese nicht korrekt gewählt kann die Maschine nicht die richtigen Risslängen wiedergeben.

Da diese Compliance-Koeffizienten in den meisten Fällen, aber unbekannt sind müssen sie erst experimentell bestimmt werden. Dies geschieht über einen sogenannten '**Markerloadtest**'.

Grob gesagt versucht man durch einen Markerloadtest über verschiedene zyklische Belastungen ein linienförmiges Raster auf eine Probe zu bringen, welches mit Hilfe von mikroskopischer Betrachtungen ausgewertet werden kann. Diese Linien werden auch **Markerloads** genannt.



Mit Hilfe von Messwerten aus der Prüfmaschine und den gemessenen Ergebnissen vom Mikroskop ist es möglich einen Graphen in ein ' $a/W - u_x$ - Diagramm' einzuzeichnen, worüber es wiederum möglich ist sich, die zum Graphen zugehörige Polynomfunktion (5. Grades) anzeigen zu lassen.

Aus dieser Polynomfunktion (5. Grades) werden die Compliance-Koeffizienten C_0 bis C_5 entnommen.

Merke:

Für jede Probe mit neuer Probengeometrie, neuem E-Modul oder einem neuen Auflagerabstand muss ein neuer Markerloadtest durchgeführt werden, um exakte Ergebnisse zu erzielen.

8.2. Versuchsdurchführung (anhand einer Probe 34Z-5)

Bemerkung:

Es wird davon ausgegangen, dass die Probe bereits nach Kapitel 2 analysiert, vorbereitet und eingespannt wurde.

Als Test wird das Template 'ASTM E 647 SEB Probe 2014 Markerloadtest' verwendet.

Probenabmessungen:

B = 10mm

Material: **34CrNiMo6 + QT**

W = 20mm

L = 100mm

$a_{\text{Stereo}} = 1,95\text{mm}$ - a_{Stereo} ist die gemessene Risslänge am Stereomikroskop

Wie bereits erwähnt wird über einen Markerloadtest versucht die zugehörigen Compliance-Koeffizienten für eine bis dato unbekannte Probe zu bestimmen. Dennoch ist es für die Maschine nötig zu Beginn sechs verschiedene Compliance-Koeffizienten anzugeben.

Für meine Probe habe ich dazu die Standardkoeffizienten genommen und habe den Wert von C_0 so verändert, so dass der *Crack-Size-Check* an der Maschine das gleiche ausgibt, wie ich es bereits am Mikroskop gemessen habe.

$$a_{\text{Maschine}} = a_{\text{Stereo}} \\ [1,95 \text{ mm} = 1,95\text{mm}]$$

Daraus ergeben sich folgende (fiktive) Compliance-Koeffizienten:

$C_0 = + 0,8498$

$C_3 = - 3,2141$

$C_1 = - 3,9504$

$C_4 = + 51,5156$

$C_2 = + 2,9821$

$C_5 = - 113,0310$

Nachdem alle Parameter eingegeben wurden kann der Markerloadtest starten.

Wie bereits in der Definition erwähnt ist der Markerloadtest ein zyklischer Test, bei dem während des Tests verschiedene Parameter eingesetzt werden. Um genau zu sein werden 2 verschiedene Parameterkonfigurationen angewendet. Diese unterschiedlichen Parameter erzeugen Linien (Markerloads) auf der Probe.

Der MLT ist ein ΔK -Versuch mit einem **const $K_{\text{Max}} = \sim 20 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$ ($= \sim 0,6 \text{ kN/mm}^{3/2}$)**

**gilt für Probe 34Z-5 (Stahl), Beton bspw. benötigt wesentlich weniger*

ΔK lässt sich wie folgt berechnen: $\Delta K = K_{\text{Max}} \cdot (1 - R)$, wobei **R = 0,1 bzw. 0,5** ist.

Daraus folgen zwei verschiedene ΔK 's:

...R = 'Load Ratio'

- $\Delta K_{0,1} = K_{\text{Max}} \cdot (1 - R_{0,1}) = 0,6 \cdot (1 - 0,1) = 0,54$

- $\Delta K_{0,5} = K_{\text{Max}} \cdot (1 - R_{0,5}) = 0,6 \cdot (1 - 0,5) = 0,3$

Die beiden ΔK -Werte, sowie die zugehörigen R-Werte ('Load Ratio') werden notiert und sind für den eigentlichen Markerloadtest wichtig.

Ebenfalls wichtig sind die Werte für ' u_x ' – welche bei jedem *Crack-Size-Check* mit ausgegeben werden. Diese müssen jedes Mal notiert werden, da bei einem erneuten *Crack-Size-Check* kein Zugriff mehr auf die alten Werte ist. Dies kann später durch eine neue Programmierung verbessert werden. Der derzeitige Stand der Programmierung befindet sich an dieser Stelle noch in der 1. Version und ist dementsprechend nicht weit genug ausgereift, aber dennoch voll funktionsfähig.

Damit der Test gestartet werden kann muss der Maschine Parameter vorgegeben werden.

Dazu verwendete ich folgende Parameter:

Precrack Parameters:

Precrack Wave Shape:	True Sine Tapered
Precrack Final Crack Limit:	4,00mm
Precrack Frequency:	10Hz
Precrack Load Ratio:	0,1
Precrack Lower LSF:	10%
Precrack Upper LSF:	90%
Precrack Cycle Limit:	1.000.000
Precrack Final Maximum K:	0,6 kN/mm ^{3/2}

FCG Parameters:

Control Mode:	Delta K		
FCG Load Ratio:	0,1	bzw.	0,5
FCG Delta K Initial:	0,54 kN/mm ^{3/2}	bzw.	0,3
Normalized K Gradient (C):	0,0 mm ⁻¹		
FCG Frequency:	20 Hz		
FCG Wave Shape:	True Sine Tapered		

Data Storage Parameters:

Precrack Save Percent Limit:	0,00%
Store Every Nth Precrack Cycle:	100
FCG Lower LSF Percentage:	10%
FCG Upper LSF Percentage:	90%
Store Every Nth FCG Cycle:	2000

Test Termination Parameters:

FCG Final Crack Limit:	15mm
FCG Crack Growth Rate Limit:	1,000E-002 mm/Cycle
Outside CG Limits Allowed:	3 count
FCG Cycle Limit:	10.000.000

Nachdem alle Parameter eingegeben wurden kann nun der MLT gestartet werden.
Dabei wird folgender Ablauf eingehalten:

- ① Crack Size Check starten und die gemessene Risslänge a_0 und den Wert für u_x aufschreiben.
- ② Nun wird der Schalter für 'Precrack Specimen' betätigt. Nachdem der Prozess durchgelaufen ist wird ein erneuter Crack-Size-Check gestartet. Die gemessene Risslänge wird als a_1 (bzw. a_{Precrack}) deklariert und aufgeschrieben. Das Gleiche gilt für den Wert von u_x .
- ③ Nun geht es über in den eigentlichen Markerloadtest. Es werden schrittweise mehrere Fatigue Crack Growth (FCG)-Tests gefahren über die, die sogenannten Markerloads auf die Probe gebracht werden.

Damit unterschieden werden kann, wo der Precrack beendet und der eigentliche Markerloadtest gestartet wurde wird im Anschluss zum Precrack die Parameter unter 'FCG Paramaters' folgendermaßen geändert:

FCG Load Ratio:	0,5
FCG Delta K Initial:	0,3 kN/mm^{3/2}

Nachdem das Parameterfenster mit OK bestätigt wurde, wird über den Schalter 'FCG Test' die erste Markerload-Linie gesetzt. Es ist ausreichend, die Risslänge um ein $\Delta a = 0,1\text{mm}$ zu erweitern. Anschließend wird der Prozess von Hand gestoppt.

- ④ Nun werden die FCG-Parameter wieder geändert. Dieses Mal wird eine Load Ratio von 0,1 und der dazu berechnete ΔK -Wert genutzt:

FCG Load Ratio:	0,1
FCG Delta K Initial:	0,54 kN/mm^{3/2}

Das Fenster wird ebenfalls mit OK bestätigt und anschließend ein neuer FCG-Test gestartet.

Im Normalfall wird eine Risslängenänderung von $\Delta a = 0,9\text{mm}$ angestrebt, aber da bereits durch den Punkt (3) der Riss bereits um $0,1\text{mm}$ erweitert wurde wird nur für den 1. Fall eine Risslängenänderung von $\Delta a = 0,8\text{mm}$ angestrebt.

Nachdem der Test beendet wurde wird ein *Crack-Size-Check* gemacht und wieder die beiden Werte a_i und u_x aufgeschrieben.

5

Nachdem der Test durchgelaufen ist wird die nächste Markerload-Linie gesetzt.

Es werden die Parameter wieder auf eine Load Ratio von 0,5 und dem berechneten ΔK -Wert gesetzt:

FCG Load Ratio: 0,5
FCG Delta K Initial: 0,3 kN/mm^{3/2}

Nun wird wieder ein FCG-Test gefahren mit einem $\Delta a = 0,1\text{mm}$. Nachdem die Risslängenänderung erreicht wurde wird wieder von Hand gestoppt. Eine neue Markerload-Linie wurde gesetzt.

6

Von nun an werden die Punkte (4) und (5) immer alternierend durchgeführt bis die Probe die maximale Risslänge von 15mm erreicht hat.

Es soll am Ende folgende(s) Methodik / Raster eingehalten werden:

Startwert:	$a_0 = 1,95\text{mm}$	Crack-Size-Check durchführen
Precrack:	$a_1 = 4,00\text{mm}$	Crack-Size-Check durchführen
Markerload-Linie:	$a_L = 4,10\text{mm}$	
Risswachstum:	$a_2 = 4,90\text{mm}$	Crack-Size-Check durchführen
Markerload-Linie:	$a_L = 5,00\text{mm}$	
Risswachstum:	$a_3 = 5,90\text{mm}$	Crack-Size-Check durchführen
Markerload-Linie:	$a_L = 6,00\text{mm}$	
Risswachstum:	$a_4 = 6,90\text{mm}$	Crack-Size-Check durchführen
	.	
	.	
Markerload-Linie:	$a_L = 14,0\text{mm}$	
Risswachstum:	$a_{12} = 14,9\text{mm}$	Crack-Size-Check durchführen
Markerload-Linie:	$a_L = 15,0\text{mm}$	

Sind die 15mm erreicht ist der Markerloadtest abgeschlossen.
Es kann die Probe nun mit Hilfe der Maschine durchgebrochen werden.

*Auf der nächsten Seite finden Sie die Versuchsergebnisse aus meinem Test für die **Probe 34Z-5**.*

Versuchsergebnisse von Probe 34Z-5:

	Cycle	ΔK	K_{Max} [kN/mm ^{3/2}]	Gemessene Risslänge		$u_{x,i}$
				Maschine [mm]	Stereomikroskop [mm]	
a_0	-	-	-	1,950	1,950	0,24000
a_1	-	-	0,60	4,001	3,160	0,19961
a_L	3256	0,30	0,60	4,100	Markerload-Linie	
a_2	22669	0,54	0,60	4,900	4,547	0,18171
a_L	33188	0,30	0,60	5,000	Markerload-Linie	
a_3	52600	0,54	0,60	5,891	5,802	0,16280
a_L	62965	0,30	0,60	6,000	Markerload-Linie	
a_4	80493	0,54	0,60	6,900	7,004	0,14491
a_L	89534	0,30	0,60	7,000	Markerload-Linie	
a_5	104887	0,54	0,60	7,901	8,100	0,12824
a_L	113267	0,30	0,60	8,000	Markerload-Linie	
a_6	127048	0,53	0,60	8,901	9,288	0,11239
a_L	135745	0,29	0,60	9,001	Markerload-Linie	
a_7	149090	0,52	0,59	9,902	10,425	0,09700
a_L	158531	0,28	0,59	10,004	Markerload-Linie	
a_8	171113	0,51	0,58	10,902	11,526	0,08219
a_L	181682	0,26	0,58	11,000	Markerload-Linie	
a_9	194461	0,47	0,57	11,901	12,626	0,06783
a_L	206853	0,23	0,57	12,000	Markerload-Linie	
a_{10}	221114	0,41	0,53	12,957	13,741	0,05304
a_L	232889	0,17	0,53	13,001	Markerload-Linie	
a_{11}	249402	0,32	0,49	13,912	14,841	0,04000
a_L	Der Wert ΔK stieg nur noch sehr langsam an, was dazu führte, dass das Risswachstums nicht weiter anstieg (aufgrund des zu geringen $\Delta K / K_{Max}$).					
a_{12}						
a_L	Der Test wurde also aus Zeitgründen nicht bis 15mm Endrisstiefe gefahren.					

Bemerkung:

Der Test wurde bei einer Risslänge (laut Maschine) bei 13,9mm von Hand abgebrochen. Es wurde zuletzt noch einmal ein Crack-Size-Check gemacht, damit noch ein weiterer Messpunkt für u_x vorhanden ist.

Anschließend wurde die Probe zerbrochen und am Stereomikroskop ausgewertet.

8.3. Auswertung

Die Auswertung der Werte erfolgt über ein 'a/W – u_x – Diagramm'

In dieses Diagrammes wird ein Graph eingezeichnet, der mit Hilfe einer *Trendlinie* eine Polynomfunktion (5. Grades) ausgeben kann. Die einzelnen Polynome spiegeln die Compliance-Koeffizienten C_0 bis C_5 wider.

Um so eine Trendlinie einfügen zu können ist das Programm **Microsoft Excel 2013** (evtl. auch 2007/2010) nötig. Es wird ein Diagramm mit einem Graphen erstellt.

Anschließend *Rechtsklick auf den Graphen → Trendlinie hinzufügen*.

Es wird ein neues Fenster eingeblendet mit verschiedenen *Trendlinienoptionen*.

Da wir eine Polynomfunktion 5. Grades wollen ist es nötig die Trendlinienoption:

'*Polynomisch (Grad: 5)*' anzuwählen. Anschließend findet man im unteren Teil dieser Optionen eine Funktion die lautet: '*Formel im Diagramm anzeigen*'.

Diese Funktion wird aktiviert und dadurch wird, die für den Graphen zugehörige Polynomfunktion, dargestellt.

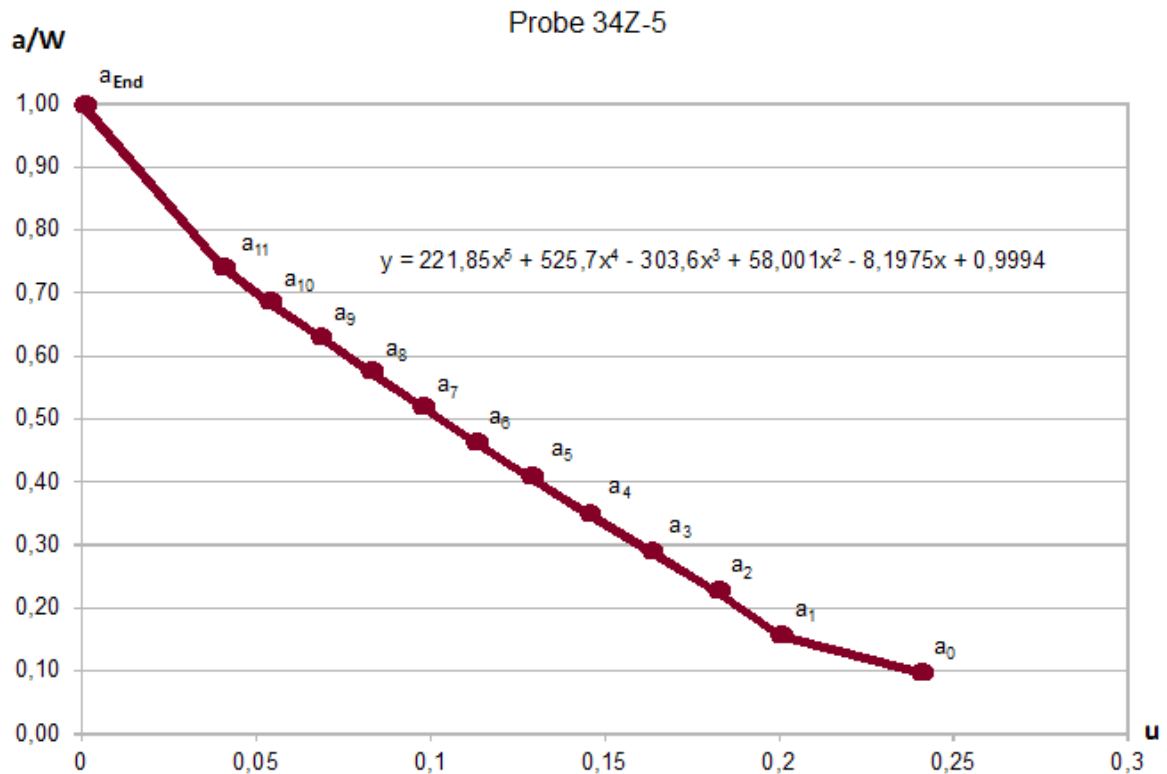
Da der Test aus Sicherheitsgründen bis maximal 15mm Endrisstiefe gefahren wird ist es nötig einen Fixpunkt zu finden, der den Graphen in die richtige Richtung lenkt.

Dieser Fixpunkt ist aufgrund theoretischer Grundlagen am Ende der Probe zu finden.

Es wird angenommen, dass die Probe komplett durchgebrochen wurde ($a = 20\text{mm}$).

Der dazugehörige u_x -Wert wäre dann $u_x = 0,00$. Dieser Punkt wird in den Graphen mit eingezeichnet.

	a	W	a / W	u_x
a_0	1,950	20,00	0,0975	0,2400
a_1	3,160	20,00	0,1580	0,1996
a_2	4,547	20,00	0,2274	0,1817
a_3	5,802	20,00	0,2901	0,1628
a_4	7,004	20,00	0,3502	0,1449
a_5	8,100	20,00	0,4050	0,1282
a_6	9,288	20,00	0,4644	0,1124
a_7	10,425	20,00	0,5213	0,0970
a_8	11,526	20,00	0,5763	0,0822
a_9	12,626	20,00	0,6313	0,0678
a_{10}	13,741	20,00	0,6871	0,0530
a_{11}	14,841	20,00	0,7421	0,0400
a_{End}	20,000	20,00	1,0000	0,0000



Anhand der Messwerte ist folgender Graph mit folgender Polynomfunktion entstanden:

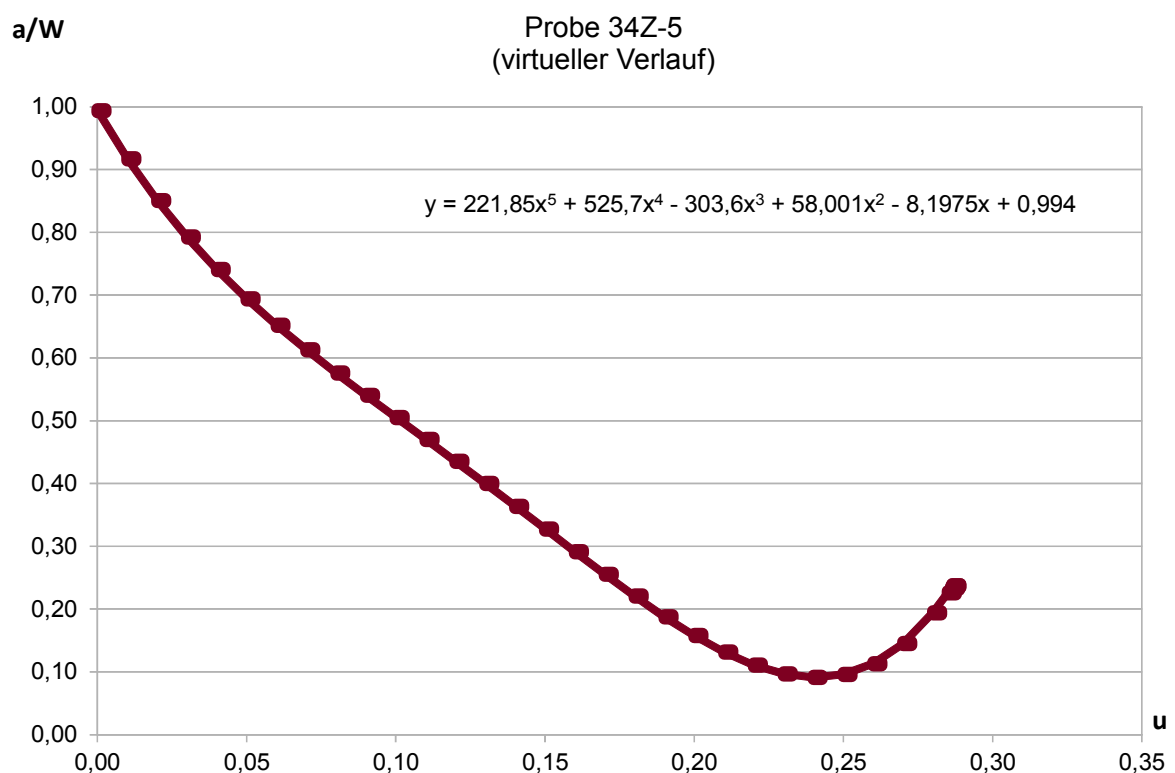
$$y = 221,85x^5 + 525,7x^4 - 303,6x^3 + 58,001x^2 - 8,1975x + 0,9994$$

Allerdings sieht der Graph sehr merkwürdig und 'unnatürlich' aus.

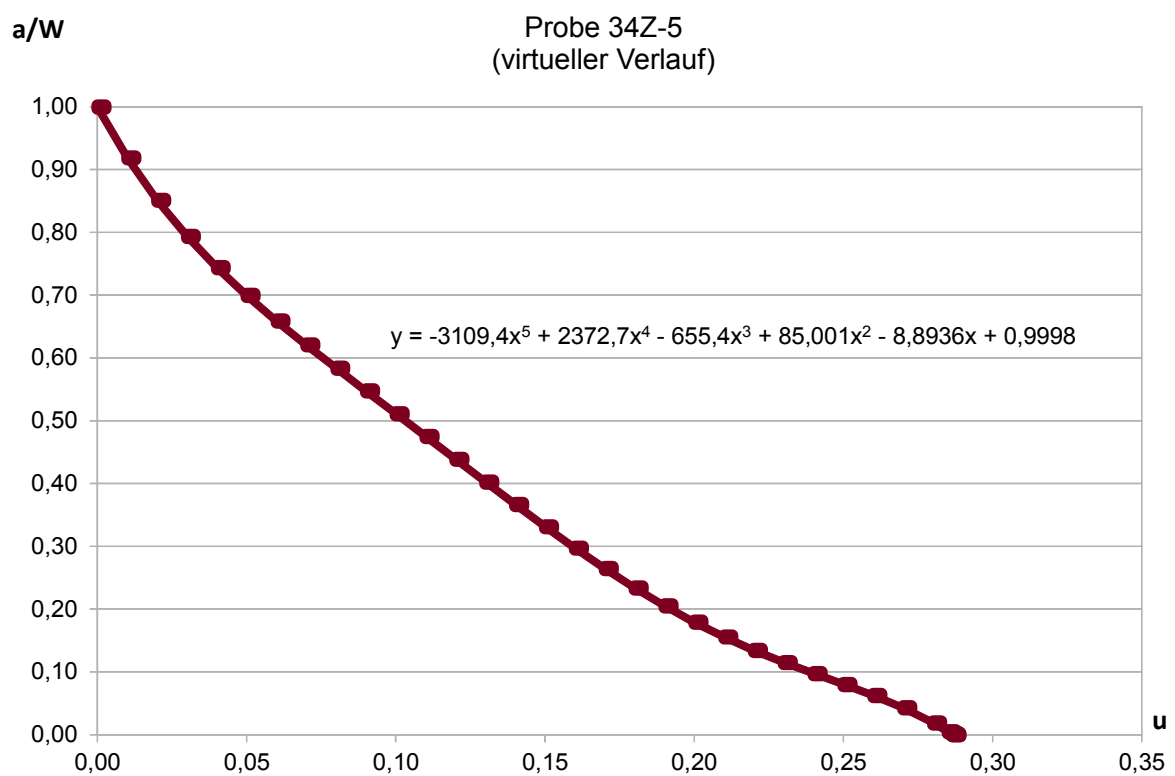
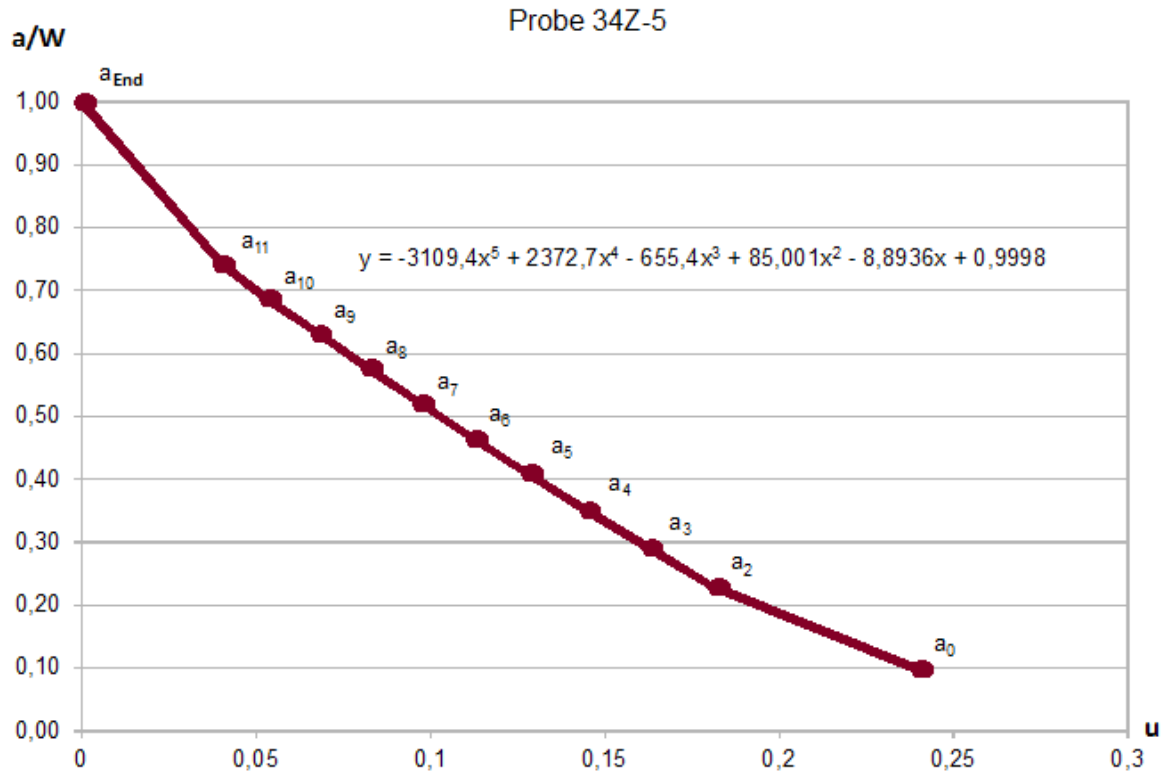
Zwischen den Punkten a_0 und a_2 ist ein Knick zu vermerken.

Wahrscheinlich ist dies auf eine Fehlmessung im Punkt a_1 zurückzuführen.

Man kann es einfach überprüfen, indem man den Graphen einfach virtuell weiterlaufen lässt. Der Graph würde dementsprechend dann so verlaufen:



Wie man sieht nimmt der Graph einen untypischen Verlauf ab einem Wert $u_x > 0,25$ ein. Das bedeutet, dass diese Gleichung, so wie sie angegeben wurde nicht korrekt sein kann. Demnach wird versucht die Kurve etwas zu begradigen. Am nahesten liegt es da, den Wert a_1 zu löschen und ohne ihn fortzufahren. Nachdem der Punkt a_1 gelöscht wurde, wird ein neuer Graph erstellt mit einer neuen Polynomfunktion, welcher am Ende wieder über einen virtuellen Kurvenverlauf geprüft wird.



Da der Wert a_1 ignoriert/gelöscht wurde hat der Graph einen neuen Verlauf eingenommen. Zusätzlich ist eine neue Polynomfunktion entstanden, die mit der ursprünglichen keine Gemeinsamkeit mehr hat.

Für mein Empfinden spiegelt der jetzige Kurvenverlauf einen für einen Markerloadtest typischen Kurvenverlauf nahezu wider. Demnach würde ich aus dieser Polynomfunktion die jeweiligen Compliance-Koeffizienten entnehmen und versuchen damit zyklische Tests zu fahren. Ob diese Koeffizienten korrekt sind kann man am Ende eines zyklischen Tests mit einem Stereomikroskop überprüfen, indem man die Probe am Ende des Tests (bei ca. 15mm Risstiefe) durchbricht und die gemessenen Risslängen zwischen Maschine und Stereomikroskop vergleicht.

Folgende Compliance-Koeffizienten werden für weitere zyklische Tests genutzt:

C_0	= + 0,9998	C_3	= - 655,4
C_1	= - 8,8936	C_4	= + 2372,7
C_2	= + 85,001	C_5	= - 3109,4

Das Ergebnis für den Markerloadtest könnte noch präziser gestaltet werden, indem man den virtuellen Kurvenverlauf in einen realen Kurvenverlauf umwandelt. Das bedeutet man benötigt eine Probe mit einer kleineren Startrisstiefe ($a_0 < 1,95\text{mm}$) als die der zuletzt getesteten *Probe 34Z-5*. Des Weiteren müsste der Test nicht nur bis 15mm gefahren werden, sondern beispielsweise bis 17mm und mehr.

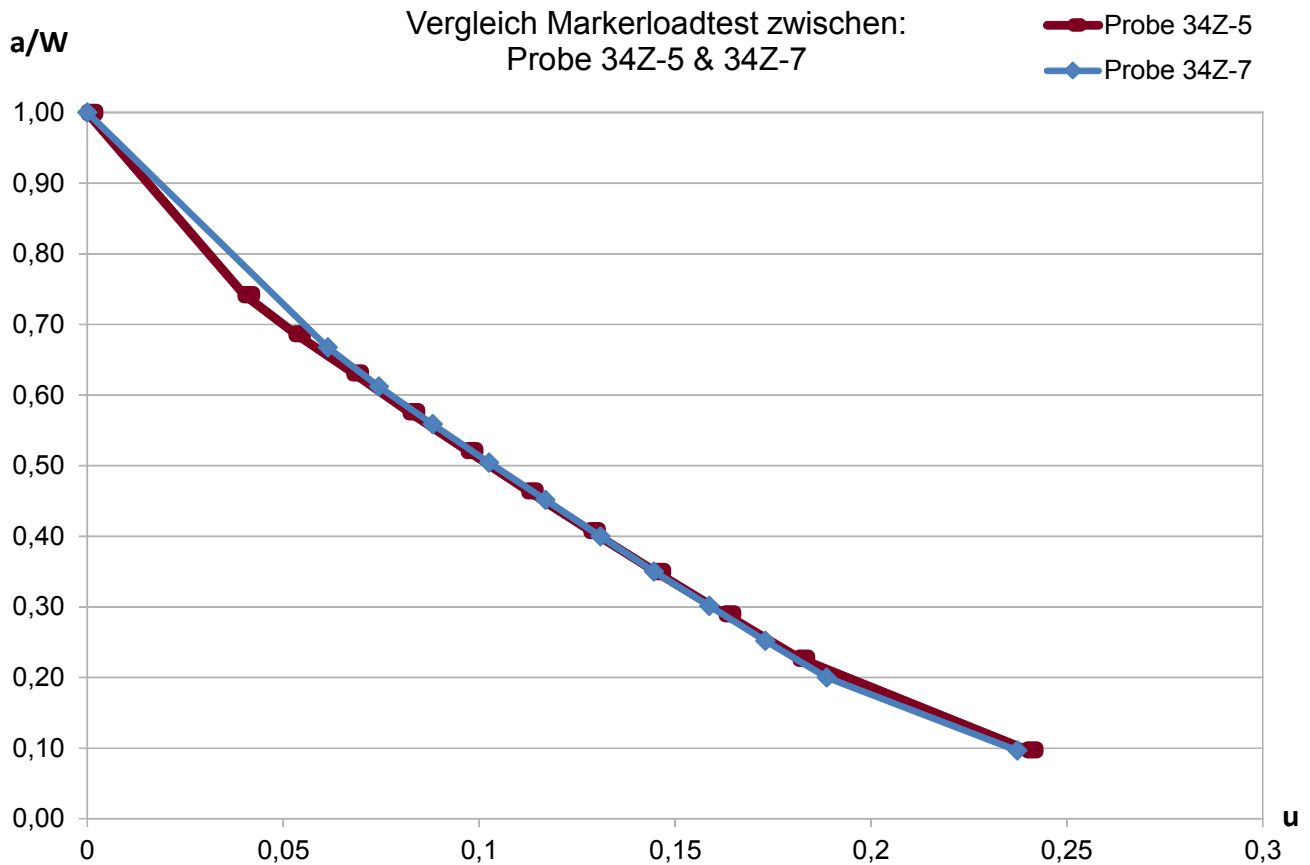
Dies müsste, aber in einem neuen Versuch getestet werden, ob diese Herangehensweise überhaupt realisierbar ist oder, ob die Probe ab Risstiefen größer 15mm evtl. kollabiert und demnach unrealistische Ergebnisse ausgibt.

Um meine Ergebnisse zu stützen habe ich einen zweiten Markerloadtest gestartet mit den von mir experimentell bestimmten Koeffizienten. Es stellte sich heraus, dass die Startrisstiefe a_0 noch nicht korrekt von der Maschine gemessen wurde. Demnach habe ich die Werte für C_0 angepasst, sodass die Startrisstiefe nun korrekt gemessen wurde.

Alternativ hätte ich auch das E-Modul ändern können. **Laut Norm ist es erlaubt das E-Modul um +/- 10% zu verändern.** Mit dieser Änderung hätte die Maschine auch die korrekte Startrisstiefe gemessen. Dennoch entschied ich mich dazu das C_0 zu ändern, da ich noch nicht genau wusste, wie das E-Modul die Ergebnisse vom Markerloadtest beeinflussen würde.

Nachdem die Maschine die korrekte Startrisstiefe gemessen hatte, führte ich den Markerloadtest exakt nach dem Schema in Kapitel 8.2, Abs 6 aus. Leider ist ab 13mm Risstiefe etwas schief gelaufen und die Maschine hat die Probe zerbrochen.

Zum Vergleich der beiden Markerloadtests erstellte ich dennoch ein Diagramm, in dem beide Tests als Graphen dargestellt wurden.



Wie man eindeutig sehen kann ist der Verlauf der beiden Kurven nahezu identisch. Lediglich am Ende ist eine kleine Abweichung zu vermerken. Das liegt aber daran, dass der zweite Markerloadtest knapp 1mm vorher die Probe zerbrochen hat. Dementsprechend fehlen da bereits ein bis zwei Messpunkte.

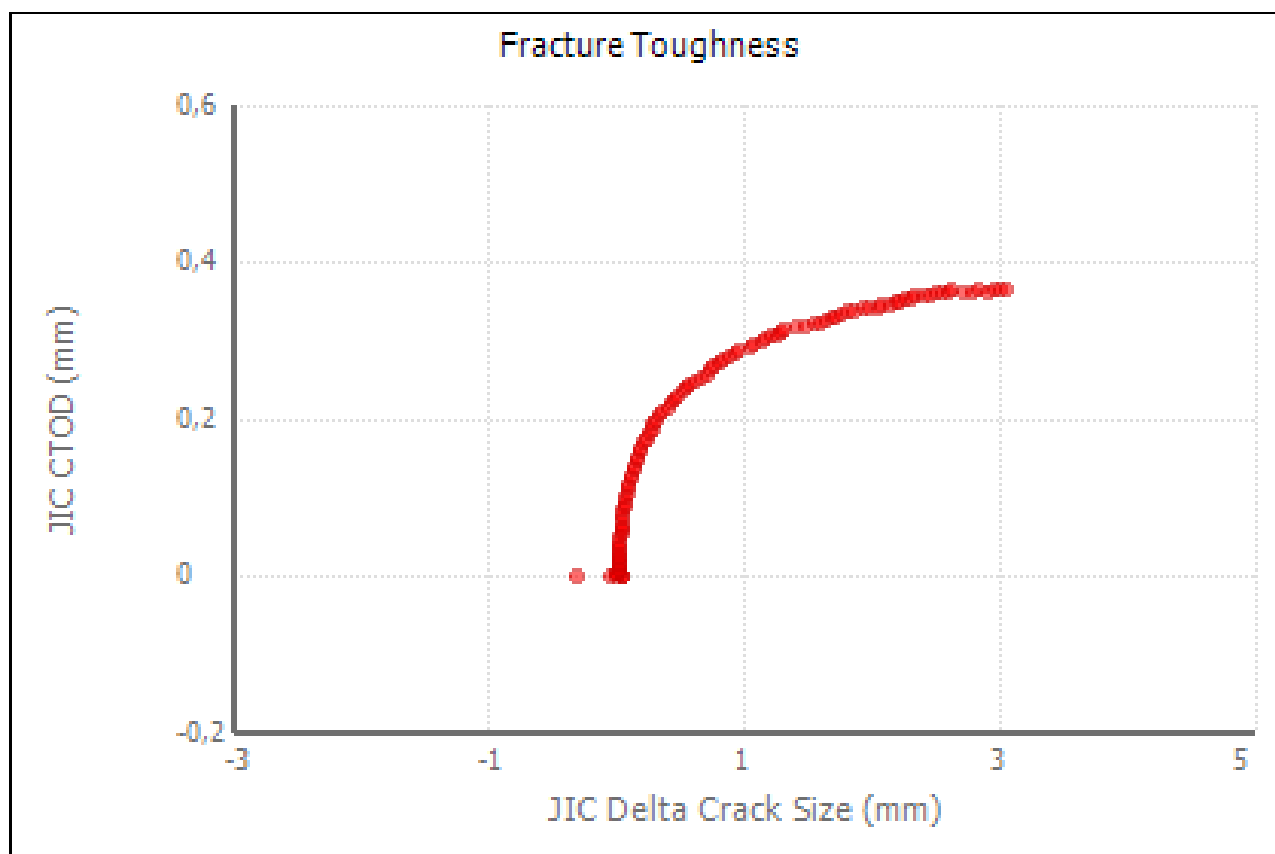
Es ist auch zu sehen, dass die Kurve von Probe 34Z-7 keinen Knick wie Anfangs die Probe 34Z-5 besitzt. Dies stützt meine These, dass am Punkt a_1 der Probe 34Z-5 eine Fehlmessung aufgetreten ist.

Da diese Kurven nahezu identisch sind werde ich also meine Koeffizienten (siehe S. 58) vorerst als '**richtig**' anerkennen und versuche damit *zyklische Tests* zu fahren.

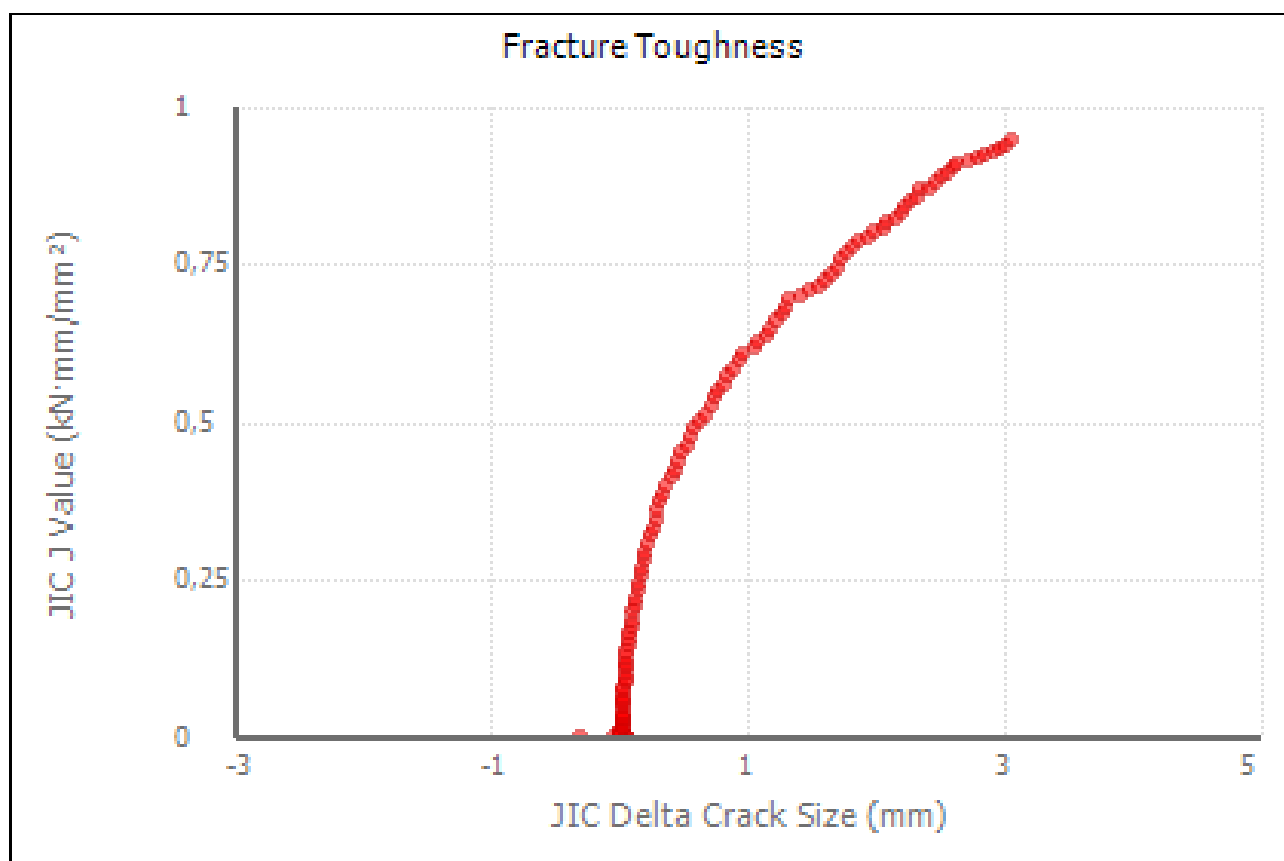
Gegebenfalls wird bei einem zyklischen Test das E-Modul angepasst, sodass die Startrisstiefe korrekt gemessen wird. An den Koeffizienten soll nichts mehr geändert werden.

9. Anhang II – Messergebnisse Probe 34S-24

(Start)		(Fortsetzung – Teil 1)		(Fortsetzung – Teil 2)	
delta a [mm]	JIC CTOD [mm]	delta a [mm]	JIC CTOD [mm]	delta a [mm]	JIC CTOD [mm]
-0,3226877352	-0,0007247667	0,1186032405	0,1296218332	1,2552320337	0,3085324263
-0,0536054962	-0,0006770469	0,1308020804	0,1352647631	1,284224211	0,3124735879
0,0350911779	-0,0003960553	0,141611513	0,1416579139	1,3215118854	0,3157036062
0,0377833968	0,0001490319	0,1551456991	0,147492436	1,39496248	0,3175237402
0,0487441878	0,0008382849	0,1711919142	0,1532297877	1,466255801	0,3194139453
-0,006134585	1,94E-03	0,1817194071	0,1590707552	1,5526603956	0,3207267025
0,0205220591	0,0029264316	0,1970184322	0,1649638164	1,5960307811	0,3236956415
0,0086981381	0,0042657501	0,2130394718	0,1708113388	1,6469787995	0,3260394236
0,0051409686	0,005772898	0,2299358985	0,1765330642	1,6940597051	0,3287497262
0,0277335201	0,0073051621	0,2519879205	0,1822201836	1,7246148148	0,3318168976
0,0319270464	0,0092293502	0,2770544263	0,1877695813	1,758148506	0,3350442989
0,0119642821	0,0114749277	0,2946974841	0,193412059	1,8000332372	0,3374934354
0,0278252846	0,0137028318	0,3172584963	0,1988303073	1,8549703891	0,3394860155
0,0175826974	0,0163384272	0,3363533207	0,2044856757	1,9240166628	0,3403216261
0,0139719534	0,0191861931	0,3629400689	0,2096756876	1,9743742147	0,3424598568
0,0217017913	0,0220497894	0,3912416616	0,2148711188	2,0411326094	0,3430088214
0,0177569532	0,0252094927	0,4251715497	0,2197428338	2,0724790563	0,3461658203
0,0157990091	0,028719049	0,4571072383	0,2251842664	2,1376763733	0,3465343146
0,0172820471	0,0322656304	0,4826559326	0,2303678495	2,1832406403	0,3485486394
0,0213945619	0,0358910492	0,5179145773	0,2352312909	2,2269123924	0,3506991123
0,0261933396	0,0399951162	0,5443886148	0,2403692944	2,2623366988	0,3529357027
0,0218308902	0,044273349	0,5743718761	0,245067178	2,3063290133	0,3547126873
0,0246211815	0,048678674	0,6228349133	0,2494488332	2,3368572418	0,3572688187
0,0392996572	0,0531093814	0,6677291908	0,2540253367	2,419986337	0,356690772
0,0338406529	0,0578425217	0,7044250117	0,2582218388	2,4682479467	0,3576585762
0,0367711763	0,062774381	0,7386073598	0,26294695	2,503494534	0,360021043
0,0354083806	0,0675216822	0,7666384904	0,267711113	2,5427830297	0,361504609
0,0333638348	0,0730472822	0,800277119	0,2716711758	2,5913663237	0,3624973446
0,0379826755	0,0784017683	0,8322184371	0,2760027737	2,6330005793	0,3639386226
0,0520610887	0,0837256064	0,8744269803	0,2802474584	2,7126885505	0,3629584678
0,0626590106	0,0893256884	0,9191949765	0,2842833971	2,7917247112	0,3620603654
0,0679350433	0,0947434571	0,958246832	0,288212316	2,8322135763	0,363522481
0,0775462503	0,1003337086	1,0423134507	0,2907591435	2,9078338395	0,3622227802
0,0850024275	0,1060880352	1,0817478103	0,2946796527	2,9500119213	0,3634360424
0,0913620298	0,112102662	1,1337239527	0,2979371698	2,9994803063	0,3638622788
0,0999082666	0,1179820937	1,1739256118	0,3015841693	3,0432481051	0,3645675972
0,1090927477	0,1238531092	1,2133852192	0,3051772303	(Ende)	



(Start)		(Fortsetzung – Teil 1)		(Fortsetzung – Teil 2)	
delta a	JIC J Value	delta a	JIC J Value	delta a	JIC J Value
[mm]	[kN·mm/mm ²]	[mm]	[kN·mm/mm ²]	[mm]	[kN·mm/mm ²]
-0,3226877352	0,0004546157	0,1186032405	0,2222578771	1,2552320337	0,6713977770
-0,0536054962	0,0009497881	0,1308020804	0,2342034851	1,2842242110	0,6830074944
0,0350911779	0,0017717131	0,1416115130	0,2461754963	1,3215118854	0,6942721466
0,0377833968	0,0029039486	0,1551456991	0,2584267134	1,3949624800	0,7020590557
0,0487441878	0,0042560093	0,1711919142	0,2706427983	1,4662558010	0,7099542444
-0,0061345850	0,0059480956	0,1817194071	0,2826498086	1,5526603956	0,7166372939
0,0205220591	0,0077736167	0,1970184322	0,2949825528	1,5960307811	0,7264882698
0,0086981381	0,0100061622	0,2130394718	0,3080910062	1,6469787995	0,7360610800
0,0051409686	0,0125037915	0,2299358985	0,3212774365	1,6940597051	0,7458443910
0,0277335201	0,0151220376	0,2519879205	0,3340225579	1,7246148148	0,7573481865
0,0319270464	0,0181292333	0,2770544263	0,3474093140	1,7581485060	0,7684135749
0,0119642821	0,0215477609	0,2946974841	0,3610028503	1,8000332372	0,7781133301
0,0278252846	0,0252665161	0,3172584963	0,3741396050	1,8549703891	0,7864243750
0,0175826974	0,0294484217	0,3363533207	0,3875760717	1,9240166628	0,7932908755
0,0139719534	0,0336673216	0,3629400689	0,4001193497	1,9743742147	0,8016121847
0,0217017913	0,0383279279	0,3912416616	0,4134556417	2,0411326094	0,8080797397
0,0177569532	0,0434354485	0,4251715497	0,4262783130	2,0724790563	0,8181005267
0,0157990091	0,0487587102	0,4571072383	0,4387304015	2,1376763733	0,8240328096
0,0172820471	0,0542554044	0,4826559326	0,4515012807	2,1832406403	0,8327100678
0,0213945619	0,0603302014	0,5179145773	0,4640522425	2,2269123924	0,8418502305
0,0261933396	0,0671344090	0,5443886148	0,4777471459	2,2623366988	0,8509357821
0,0218308902	0,0741689730	0,5743718761	0,4908979962	2,3063290133	0,8591677775
0,0246211815	0,0811551511	0,6228349133	0,5025824899	2,3368572418	0,8691583060
0,0392996572	0,0883039158	0,6677291908	0,5143874694	2,4199863370	0,8725995477
0,0338406529	0,0961212485	0,7044250117	0,5270504124	2,4682479467	0,8799456241
0,0367711763	0,1041904811	0,7386073598	0,5390379110	2,5034945340	0,8889991531
0,0354083806	0,1123695586	0,7666384904	0,5499288592	2,5427830297	0,8973926321
0,0333638348	0,1211145727	0,8002771190	0,5625809660	2,5913663237	0,9047125951
0,0379826755	0,1299467249	0,8322184371	0,5748711299	2,6330005793	0,9124409064
0,0520610887	0,1384716047	0,8744269803	0,5867250934	2,7126885505	0,9150853588
0,0626590106	0,1476473256	0,9191949765	0,5985349257	2,7917247112	0,9176033492
0,0679350433	0,1571689098	0,9582468320	0,6092381804	2,8322135763	0,9248340281
0,0775462503	0,1668364857	1,0423134507	0,6165609136	2,9078338395	0,9275021322
0,0850024275	0,1771408692	1,0817478103	0,6282418580	2,9500119213	0,9347625529
0,0913620298	0,1880651714	1,1337239527	0,6388453233	2,9994803063	0,9408986054
0,0999082666	0,1991916913	1,1739256118	0,6499641747	3,0432481051	0,9472736623
0,1090927477	0,2108527543	1,2133852192	0,6609436107	(Ende)	



10. Anhang III – Messergebnisse der Probe 34Z-6

(Start)		(Fortsetzung – Teil 1)		(Fortsetzung – Teil 2)	
Cycle	a	Cycle	a	Cycle	a
[count]	[mm]	[count]	[mm]	[count]	[mm]
1	1,36824	158202	13,56075	159949	13,70022
42	3,95243	158242	13,56448	159989	13,70321
82	3,99978	158282	13,56684	160028	13,70589
122	3,95548	158321	13,56990	160068	13,70901
162	3,98237	158361	13,57271	160108	13,71263
202	4,01956	158401	13,57639	160147	13,71491
242	4,03468	158440	13,58000	160187	13,71808
281	4,02145	158480	13,58318	160226	13,72192
321	4,01649	158520	13,58694	160266	13,72538
361	4,01330	158560	13,58984	160306	13,72840
758	4,00457	158600	13,59265	160345	13,73113
1155	4,00425	158639	13,59606	160385	13,73402
1551	4,00849	158679	13,59942	160425	13,73655
1948	4,00589	158719	13,60174	160464	13,73947
2344	4,00700	158758	13,60464	160504	13,74287
2741	4,01215	158798	13,60797	160544	13,74648
3138	4,01516	158838	13,61228	160583	13,74912
3535	4,02036	158877	13,61458	160623	13,75205
3932	4,02305	158917	13,61732	160663	13,75531
7901	4,07296	158957	13,62059	160703	13,75793
11850	4,14500	158996	13,62403	160743	13,76134
15821	4,32474	159036	13,62669	160782	13,76430
19791	4,51332	159076	13,62949	160822	13,76783
23759	4,70917	159115	13,63330	160862	13,77144
27726	4,91535	159155	13,63622	160901	13,77406
31694	5,12534	159195	13,63898	160942	13,77696
35661	5,34692	159234	13,64274	160982	13,78001
39631	5,57485	159274	13,64604	161021	13,78343
79318	8,04029	159314	13,64887	161061	13,78549
118996	10,65687	159353	13,65192	161100	13,78940
157646	13,51717	159393	13,65529	161140	13,79224
157687	13,52024	159433	13,65842	161180	13,79554
157727	13,52389	159472	13,66130	161219	13,79803
157766	13,52691	159512	13,66409	161259	13,80051
157806	13,52983	159552	13,66753	161299	13,80414
157845	13,53253	159592	13,67061	161338	13,80784
157885	13,53551	159632	13,67382	161378	13,81112
157925	13,53877	159671	13,67664	161418	13,81386
157964	13,54244	159711	13,68082	161457	13,81693
158004	13,54535	159751	13,68384	161497	13,82068
158044	13,54788	159790	13,68650	161537	13,82265
158083	13,55144	159830	13,69071	161576	13,82563
158123	13,55424	159870	13,69337	161616	13,82983
158163	13,55749	159909	13,69606	161656	13,83288

(Fortsetzung – Teil 3)		(Fortsetzung – Teil 4)		(Fortsetzung – Teil 5)	
Cycle	a	Cycle	a	Cycle	a
[count]	[mm]	[count]	[mm]	[count]	[mm]
161695	13,83568	163442	13,97367	165210	14,11168
161735	13,83874	163482	13,97581	165250	14,11514
161775	13,84186	163522	13,97912	165290	14,11746
161814	13,84459	163561	13,98226	165329	14,12172
161854	13,84863	163601	13,98438	165369	14,12497
161894	13,85110	163641	13,98833	165409	14,12806
161933	13,85438	163680	13,99162	165448	14,13022
161973	13,85738	163720	13,99453	165488	14,13430
162013	13,86067	163760	13,99804	165527	14,13700
162052	13,86402	163799	14,00103	165567	14,13972
162092	13,86622	163839	14,00353	165607	14,14411
162132	13,86942	163879	14,00686	165647	14,14617
162172	13,87326	163918	14,00912	165687	14,15006
162212	13,87659	163958	14,01341	165727	14,15254
162252	13,87836	163998	14,01621	165766	14,15602
162292	13,88150	164037	14,01993	165806	14,15925
162332	13,88491	164077	14,02231	165846	14,16260
162371	13,88819	164117	14,02662	165885	14,16575
162411	13,89128	164156	14,02917	165925	14,16841
162451	13,89434	164196	14,03219	165965	14,17203
162490	13,89729	164236	14,03476	166004	14,17333
162530	13,90035	164275	14,03807	166044	14,17763
162570	13,90374	164315	14,04046	166084	14,18060
162609	13,90699	164355	14,04458	166123	14,18373
162649	13,91031	164395	14,04796	166163	14,18694
162689	13,91309	164435	14,05103	166203	14,18988
162728	13,91660	164475	14,05427	166242	14,19302
162768	13,92019	164513	14,05657	166282	14,19570
162808	13,92207	164576	14,06148	166322	14,19962
162847	13,92565	164616	14,06521	166362	14,20236
162887	13,92904	164655	14,06712	166402	14,20453
162927	13,93121	164695	14,07147	166441	14,20820
162966	13,93519	164735	14,07405	166481	14,21112
163006	13,93693	164774	14,07780	166521	14,21421
163046	13,94181	164814	14,08041	166560	14,21735
163085	13,94396	164854	14,08325	166600	14,22047
163125	13,94682	164893	14,08737	166640	14,22385
163165	13,95064	164933	14,09059	166679	14,22615
163204	13,95351	164973	14,09311	166719	14,22940
163244	13,95720	165012	14,09639	166759	14,23237
163284	13,96014	165052	14,09900	166798	14,23617
163323	13,96292	165092	14,10247	166838	14,23963
163363	13,96661	165131	14,10498	166878	14,24230
163403	13,96942	165171	14,10833	166917	14,24578

(Fortsetzung – Teil 6)	
Cycle [count]	a [mm]
166957	14,24885
166997	14,25169
167036	14,25495
167076	14,25697
167116	14,26043
167155	14,26380
167195	14,26746
167235	14,26964
167274	14,27286
167314	14,27523
167354	14,27951
167393	14,28265
167433	14,28565
167472	14,28866
167512	14,29222
167552	14,29458
167591	14,29772
167631	14,30126
167671	14,30403
167710	14,30723
167750	14,30967
167790	14,31246
167829	14,31594
167869	14,31939
167909	14,32256
167948	14,32494
167988	14,32884
168028	14,33111
168067	14,33479
168107	14,33879
168147	14,34063
168186	14,34346
168226	14,34668
168266	14,35007
168305	14,35333
168345	14,35665
168385	14,35950
168424	14,36345
168464	14,36534
168504	14,36928
168543	14,37154
168583	14,37538
168623	14,37760
168662	14,38043

(Fortsetzung – Teil 7)	
Cycle [count]	a [mm]
168702	14,38373
168742	14,38678
168782	14,38993
168822	14,39142
168861	14,39543
168901	14,39848
168941	14,40088
168980	14,40541
169020	14,40748
169060	14,41061
169099	14,41303
169139	14,41669
169179	14,42084
169218	14,42274
169258	14,42561
169298	14,42841
169338	14,43092
169378	14,43549
169417	14,43762
169457	14,44096
169497	14,44530
169536	14,44811
169576	14,45020
169616	14,45336
169655	14,45648
169695	14,46001
169735	14,46230
169774	14,46577
169814	14,46867
169854	14,47105
169893	14,47529
169933	14,47768
169974	14,47953
170013	14,48339
170053	14,48548
170093	14,48842
170132	14,49165
170172	14,49582
170212	14,49816
170251	14,50178
170291	14,50387
170331	14,50666
170370	14,51006
170410	14,51315

(Fortsetzung – Teil 8)	
Cycle [count]	a [mm]
170449	14,51563
170489	14,51891
170529	14,52220
170568	14,52465
170608	14,52798
170648	14,53175
170687	14,53347
170727	14,53671
170767	14,53996
170806	14,54238
170846	14,54598
170886	14,54872
170925	14,55289
170965	14,55472
171005	14,55853
171044	14,56116
171084	14,56421
171124	14,56652
171163	14,57040
171203	14,57407
171243	14,57605
171282	14,57989
171322	14,58148
171362	14,58477
171401	14,58684
171441	14,58936
171480	14,59258
171520	14,59581
171560	14,59831
171599	14,60130
171639	14,60416
171679	14,60833
171718	14,61161
171758	14,61343
171798	14,61574
171837	14,61904
171877	14,62333
171917	14,62472
171956	14,62708
171996	14,63085
172036	14,63430
172075	14,63622
172115	14,63885
172155	14,64274

(Fortsetzung – Teil 9)		(Fortsetzung – Teil 10)		(Fortsetzung – Teil 11)	
Cycle	a	Cycle	a	Cycle	a
[count]	[mm]	[count]	[mm]	[count]	[mm]
161695	13,83568	163442	13,97367	165210	14,11168
161735	13,83874	163482	13,97581	165250	14,11514
161775	13,84186	163522	13,97912	165290	14,11746
161814	13,84459	163561	13,98226	165329	14,12172
161854	13,84863	163601	13,98438	165369	14,12497
161894	13,85110	163641	13,98833	165409	14,12806
161933	13,85438	163680	13,99162	165448	14,13022
161973	13,85738	163720	13,99453	165488	14,13430
162013	13,86067	163760	13,99804	165527	14,13700
162052	13,86402	163799	14,00103	165567	14,13972
162092	13,86622	163839	14,00353	165607	14,14411
162132	13,86942	163879	14,00686	165647	14,14617
162172	13,87326	163918	14,00912	165687	14,15006
162212	13,87659	163958	14,01341	165727	14,15254
162252	13,87836	163998	14,01621	165766	14,15602
162292	13,88150	164037	14,01993	165806	14,15925
162332	13,88491	164077	14,02231	165846	14,16260
162371	13,88819	164117	14,02662	165885	14,16575
162411	13,89128	164156	14,02917	165925	14,16841
162451	13,89434	164196	14,03219	165965	14,17203
162490	13,89729	164236	14,03476	166004	14,17333
162530	13,90035	164275	14,03807	166044	14,17763
162570	13,90374	164315	14,04046	166084	14,18060
162609	13,90699	164355	14,04458	166123	14,18373
162649	13,91031	164395	14,04796	166163	14,18694
162689	13,91309	164435	14,05103	166203	14,18988
162728	13,91660	164475	14,05427	166242	14,19302
162768	13,92019	164513	14,05657	166282	14,19570
162808	13,92207	164576	14,06148	166322	14,19962
162847	13,92565	164616	14,06521	166362	14,20236
162887	13,92904	164655	14,06712	166402	14,20453
162927	13,93121	164695	14,07147	166441	14,20820
162966	13,93519	164735	14,07405	166481	14,21112
163006	13,93693	164774	14,07780	166521	14,21421
163046	13,94181	164814	14,08041	166560	14,21735
163085	13,94396	164854	14,08325	166600	14,22047
163125	13,94682	164893	14,08737	166640	14,22385
163165	13,95064	164933	14,09059	166679	14,22615
163204	13,95351	164973	14,09311	166719	14,22940
163244	13,95720	165012	14,09639	166759	14,23237
163284	13,96014	165052	14,09900	166798	14,23617
163323	13,96292	165092	14,10247	166838	14,23963
163363	13,96661	165131	14,10498	166878	14,24230
163403	13,96942	165171	14,10833	166917	14,24578

(Fortsetzung – Teil 12)	
Cycle	a
[count]	[mm]
172194	14,64581
172234	14,64794
172274	14,65169
172313	14,65346
172353	14,65718
172392	14,65934
172432	14,66282
172472	14,66452
172511	14,66866
172551	14,67201
172591	14,67507
172630	14,67751
172670	14,68072
172710	14,68353
172749	14,68586
172789	14,68874
172829	14,69297
172868	14,69534
172908	14,69821
172948	14,69994
172987	14,70272
173027	14,70622
173067	14,70807
173106	14,71065
173146	14,71461
173186	14,71658
173225	14,72018
173265	14,72369
173305	14,72631
173345	14,72933
173385	14,73336
173424	14,73475
173464	14,73734
173504	14,74048
173543	14,74374
173583	14,74589
173623	14,74828
173662	14,75251
173702	14,75502
173742	14,75769
173781	14,76178
173821	14,76371
173861	14,76582
173900	14,76938

(Fortsetzung – Teil 13)	
Cycle	a
[count]	[mm]
173940	14,77311
173980	14,77496
174020	14,77906
174060	14,78029
174099	14,78445
174139	14,78705
174179	14,78846
174218	14,79331
174258	14,79479
174298	14,79713
174337	14,80084
174377	14,80334
174417	14,80640
174456	14,80785
174496	14,81127
174536	14,81364
174575	14,81758
174615	14,82032
174655	14,82364
174694	14,82634
174734	14,82922
174774	14,83140
174814	14,83490
174854	14,83647
174894	14,84007
174933	14,84265
174973	14,84484
175013	14,84832
175053	14,85168
175093	14,85436
175133	14,85666
175172	14,85981
175212	14,86275
175252	14,86426
175291	14,86767
175331	14,87110
175371	14,87280
175410	14,87459
175450	14,87903
175490	14,88183
175530	14,88435
175570	14,88704
175609	14,89094
175649	14,89315

(Fortsetzung – Teil 14)	
Cycle	a
[count]	[mm]
175689	14,89518
175728	14,89872
175768	14,90137
175808	14,90497
175848	14,90757
175888	14,91041
175928	14,91310
175968	14,91616
176007	14,91867
176047	14,92064
176087	14,92336
176127	14,92689
176167	14,93057
176207	14,93236
176246	14,93572
176286	14,93742
176325	14,94048
176365	14,94271
176405	14,94639
176444	14,94874
176484	14,95250
176524	14,95368
176563	14,95646
176603	14,95970
176643	14,96117
176682	14,96524
176722	14,96782
176762	14,96996
176801	14,97322
176841	14,97691
176881	14,97964
176920	14,98164
176960	14,98390
177000	14,98679
177039	14,98908
177079	14,99187
177119	14,99494
177158	14,99836
177198	15,00069
177238	15,00409
177277	15,00648
177317	15,00896
177357	15,01057
177397	15,01396

(Fortsetzung – Teil 15)	
Cycle	a
[count]	[mm]
177437	15,01671
177477	15,02031
177517	15,02302
177557	15,02540
177597	15,02844
177637	15,03073
177677	15,03363
177716	15,03738
177756	15,03828
177796	15,04182
177835	15,04449
177875	15,04832
177915	15,05133
177954	15,05199
177994	15,05669
178034	15,05812
178073	15,06083
178113	15,06285
178153	15,06644
178193	15,06912
178233	15,07052
178272	15,07510
178312	15,07726
178352	15,07941
178391	15,08178
178431	15,08583
178471	15,08779
178510	15,09130
178550	15,09185
178590	15,09516
178629	15,09781
178669	15,10108
178709	15,10314
178748	15,10518
178788	15,10868
178828	15,11112
178868	15,11501
178908	15,11698
178948	15,11870
178987	15,12245
179027	15,12393
179067	15,12702
179106	15,13000
179146	15,13171

(Fortsetzung – Teil 16)	
Cycle	a
[count]	[mm]
179186	15,13323
179225	15,13774
179265	15,14164
179305	15,14201
179344	15,14626
179384	15,14937
179424	15,15115
179463	15,15321
179503	15,15589
179543	15,16016
179583	15,16106
179622	15,16471
179662	15,16708
179702	15,16865
179741	15,17325
179781	15,17417
179821	15,17744
179860	15,17950
179900	15,18431
179940	15,18452
179980	15,18884
180019	15,19064
180059	15,19367
180099	15,19745
180138	15,19700
180178	15,20270
180218	15,20294
180257	15,20594
180297	15,20897
180337	15,21136
180376	15,21525
180416	15,21662
180456	15,21880
180495	15,22193
180535	15,22479
180575	15,22678
180614	15,23008
180654	15,23226
180694	15,23470
180733	15,23716
180773	15,23933
180813	15,24264
180852	15,24597
180892	15,24691

(Fortsetzung – Teil 17)	
Cycle	a
[count]	[mm]
180932	15,25143
180972	15,25298
181012	15,25664
181051	15,25857
181091	15,26002
181131	15,26207
181170	15,26601
181210	15,26868
181250	15,27184
181289	15,27394
181329	15,27730
181368	15,27995
181408	15,28172
181448	15,28340
181487	15,28755
181527	15,29006
181567	15,29166
181606	15,29247
181646	15,29607
181686	15,29888
181725	15,30211
181765	15,30431
181805	15,30732
181844	15,31020
181884	15,31216
181924	15,31582
181963	15,31637
182003	15,32020
182043	15,32211
182082	15,32495
182122	15,32658
182162	15,32975
182202	15,33291
182242	15,33523
182282	15,33736
182321	15,33978
182361	15,34222
182401	15,34517
182440	15,34716
182480	15,35186
182519	15,35261
182559	15,35401
182599	15,35723
182638	15,36196

(Fortsetzung – Teil 18)	
Cycle	a
[count]	[mm]
182678	15,36285
182718	15,36539
182757	15,36966
182797	15,36916
182837	15,37409
182876	15,37660
182916	15,38027
182956	15,37990
182995	15,38250
183035	15,38664
183075	15,38832
183114	15,39156
183154	15,39226
183193	15,39558
183233	15,39749
183273	15,40276
183312	15,40482
183352	15,40680
183392	15,41014
183431	15,41194
183471	15,41470
183511	15,41586
183550	15,41869
183590	15,42144
183630	15,42447
183669	15,42686
183709	15,42785
183749	15,43113
183788	15,43388
183828	15,43681
183868	15,43988
183908	15,44145
183948	15,44310
183987	15,44614
184027	15,44871
184067	15,45113
184106	15,45372
184146	15,45635
184186	15,45836
184225	15,46142
184265	15,46369
184305	15,46509
184344	15,46857
184384	15,47060

(Fortsetzung – Teil 19)	
Cycle	a
[count]	[mm]
184424	15,47391
184463	15,47823
184503	15,48007
184543	15,48083
184582	15,48563
184622	15,48708
184662	15,49048
184701	15,49227
184741	15,49390
184781	15,49495
184820	15,49876
184860	15,50188
184900	15,50499
184939	15,50722
184979	15,51059
185019	15,51126
185058	15,51530
185098	15,51659
185138	15,52024
185177	15,52212
185217	15,52488
185257	15,52739
185296	15,52902
185336	15,53141
185376	15,53239
185415	15,53784
185455	15,53863
185495	15,54138
185534	15,54330
185574	15,54744
185614	15,54826
185653	15,55131
185693	15,55337
185732	15,55534
185772	15,55731
185812	15,55873
185851	15,56184
185891	15,56542
185931	15,56684
185970	15,56806
186010	15,56965
186049	15,57254
186089	15,57534
186129	15,57749

(Fortsetzung – Teil 20)	
Cycle	a
[count]	[mm]
186168	15,58089
186208	15,58157
186248	15,58437
186287	15,58620
186327	15,58729
186367	15,58954
186406	15,59421
186446	15,59709
186486	15,59851
186525	15,60296
186565	15,60497
186605	15,60376
186644	15,60620
186684	15,61165
186724	15,61168
186763	15,61644
186803	15,61883
186843	15,62022
186882	15,62557
186922	15,62478
186962	15,62710
187001	15,63004
187041	15,63218
187081	15,63258
187120	15,63531
187160	15,63897
187200	15,64107
187240	15,64416
187280	15,64773
187319	15,64688
187359	15,64986
187399	15,65341
187438	15,65527
187478	15,65795
187518	15,66131
187557	15,66332
187597	15,66626
187637	15,66837
187676	15,66976
187716	15,67019
187756	15,67300
187795	15,67638
187835	15,67715
187875	15,68165

(Fortsetzung – Teil 21)	
Cycle	a
[count]	[mm]
187914	15,68294
187954	15,68463
187994	15,68588
188033	15,68960
188073	15,69280
188113	15,69428
188153	15,69789
188193	15,69970
188232	15,70117
188272	15,70151
188312	15,70548
188351	15,70833
188391	15,71113
188431	15,71184
188470	15,71305
188510	15,71892
188550	15,72149
188589	15,72034
188629	15,72464
188669	15,72592
188708	15,72831
188748	15,73114
188788	15,73205
188827	15,73661
188867	15,73767
188907	15,73920
188946	15,74212
188986	15,74372
189026	15,74688
189065	15,74898
189105	15,75136
189145	15,75280
189184	15,75682
189224	15,75781
189264	15,75911
189303	15,76307
189343	15,76573
189383	15,76871
189423	15,76952
189463	15,77233
189503	15,77515
189543	15,77692
189583	15,77865
189622	15,78117

(Fortsetzung – Teil 22)	
Cycle	a
[count]	[mm]
189662	15,78291
189702	15,78538
189741	15,78920
189781	15,79184
189821	15,79198
189860	15,79602
189900	15,79783
189940	15,79806
189979	15,80219
190019	15,80447
190059	15,80389
190098	15,80683
190138	15,80769
190178	15,81233
190217	15,81508
190257	15,81449
190297	15,81859
190336	15,82212
190376	15,82306
190416	15,82528
190455	15,82688
190495	15,82866
190535	15,83096
190574	15,83372
190614	15,83811
190654	15,83775
190693	15,83991
190733	15,84256
190772	15,84524
190812	15,84461
190852	15,84786
190892	15,85378
190932	15,85375
190972	15,85284
191011	15,85717
191051	15,85885
191091	15,86074
191130	15,86158
191170	15,86849
191210	15,86821
191249	15,87077
191289	15,87311
191329	15,87537
191368	15,87798

(Fortsetzung – Teil 23)	
Cycle	a
[count]	[mm]
191408	15,87854
191448	15,87934
191488	15,88325
191528	15,88555
191568	15,88733
191607	15,88867
191647	15,89151
191687	15,89026
191726	15,89870
191766	15,89718
191806	15,89821
191845	15,90375
191885	15,90336
191925	15,90422
191965	15,90568
192005	15,91066
192045	15,91099
192084	15,91539
192124	15,91757
192164	15,91874
192204	15,92116
192244	15,92176
192284	15,92752
192324	15,92512
192364	15,92688
192403	15,93158
192443	15,93243
192483	15,93498
192522	15,93554
192562	15,94354
192602	15,93958
192641	15,94348
192681	15,94419
192721	15,94835
192761	15,94860
192801	15,95173
192841	15,95379
192880	15,95540
192920	15,95843
192960	15,95797
192999	15,96280
193039	15,96408
193079	15,96770
193118	15,97089

(Fortsetzung – Teil 24)		(Fortsetzung – Teil 25)		(Fortsetzung – Teil 26)	
Cycle	a	Cycle	a	Cycle	a
[count]	[mm]	[count]	[mm]	[count]	[mm]
193158	15,96871	194907	16,05790	196653	16,13920
193198	15,97158	194947	16,05883	196693	16,14140
193237	15,97452	194986	16,06027	196733	16,13896
193277	15,97677	195026	16,06549	196772	16,14397
193317	15,97794	195066	16,06728	196812	16,14892
193357	15,97935	195105	16,06893	196852	16,15161
193397	15,98343	195145	16,06545	196891	16,15004
193437	15,98422	195185	16,06772	196931	16,15280
193477	15,98928	195224	16,07467	196971	16,15635
193517	15,98649	195264	16,07465	197010	16,15507
193557	15,99498	195304	16,07719	197050	16,15692
193597	15,99341	195344	16,07958	197090	16,16171
193637	15,99323	195384	16,08474	197129	16,16065
193676	15,99795	195424	16,08137	197169	16,16439
193716	16,00003	195463	16,08462	197209	16,16506
193756	16,00095	195503	16,08863	197248	16,16722
193795	16,00054	195543	16,08944	197288	16,16896
193835	16,00620	195582	16,09035	197328	16,17093
193875	16,00586	195622	16,09378	197367	16,17153
193914	16,01029	195662	16,09716	197407	16,17417
193954	16,01050	195701	16,09422	197447	16,17703
193994	16,01094	195741	16,09375	197486	16,17956
194033	16,01287	195781	16,09887	197526	16,17906
194073	16,01513	195820	16,10116	197566	16,18301
194113	16,01898	195860	16,10482	197605	16,18447
194152	16,02007	195900	16,10393	197645	16,18279
194192	16,02326	195939	16,10416	197685	16,18387
194232	16,02673	195979	16,10800	197724	16,18685
194271	16,02870	196019	16,11111	197764	16,19021
194311	16,03194	196058	16,11516	197804	16,19251
194351	16,03033	196098	16,11760	197843	16,18955
194390	16,03516	196138	16,11828	197883	16,19329
194430	16,03594	196177	16,11903	197923	16,19675
194470	16,03804	196217	16,12224	197962	16,19943
194509	16,03922	196257	16,12148	198002	16,19829
194549	16,03940	196296	16,12205	198042	16,20163
194589	16,04470	196336	16,12568	198081	16,20384
194628	16,04377	196376	16,12662	198121	16,20420
194668	16,04894	196415	16,13145	198160	16,20595
194708	16,04911	196455	16,12981	198200	16,20935
194747	16,04945	196495	16,13668	198240	16,21043
194787	16,05087	196534	16,13276	198279	16,21210
194828	16,05153	196574	16,13704	198319	16,21420
194867	16,05619	196614	16,13746	198359	16,21387

(Fortsetzung – Teil 27)	
Cycle [count]	a [mm]
198398	16,21614
198438	16,21747
198478	16,21957
198517	16,22121
198557	16,22458
198597	16,22462
198636	16,22488
198676	16,23165
198716	16,22871
198755	16,23064
198795	16,23060
198835	16,23845
198874	16,23663
198914	16,23704
198953	16,24034
198993	16,24258
199033	16,24018
199072	16,24377
199112	16,24507
199152	16,24865
199191	16,24953
199231	16,25358
199271	16,25137
199310	16,25673
199350	16,25295
199390	16,25738
199429	16,26045
199469	16,25879
199509	16,26213
199548	16,26283
199588	16,26441
199628	16,27196
199667	16,27010
199707	16,26689
199747	16,27299
199787	16,27289
199827	16,27569
199866	16,27827
199906	16,27806
199946	16,28119
199985	16,28349
200025	16,28316
200065	16,28389
200105	16,27908

(Fortsetzung – Teil 28)	
Cycle [count]	a [mm]
200145	16,25571
200185	16,13717
200225	16,26726
200265	16,28018
200305	16,28656
200345	16,27053
200385	16,26831
200425	16,27680
200465	16,27582
200505	16,27609
200545	16,26967
200585	16,27940
200625	16,27866
200665	16,28618
200705	16,28485
200745	16,28456
200785	16,28777
200825	16,27899
200865	16,27712
200905	16,28657
200945	16,28855
200985	16,27257
201026	16,28635
201067	16,26209
201107	16,25791
201147	16,27924
201187	16,25669
201223	16,25400
201268	16,28149
201308	16,26386
201348	16,26323
201388	16,26106
201428	16,19336
201468	16,12846
201508	16,07988
201548	16,19522
201588	16,08532
201628	16,15456
201668	16,19468
201708	16,17663
201748	16,19105
201788	16,16838
201828	16,17710
201868	16,22464

(Fortsetzung – Teil 29)	
Cycle [count]	a [mm]
201908	16,18029
201948	16,20334
201988	16,22432
202028	16,21875
202068	16,22962
202109	16,22840
202149	16,24905
202189	16,23923
202229	16,20181
202269	16,26583
202309	16,21233
202349	16,24035
202389	16,22138
202429	16,22498
202469	16,21381
202509	16,22135
202549	16,24906
202589	16,23004
202629	16,23365
202669	16,23975
202709	16,23732
202749	16,25468
202789	16,22373
202829	16,25421
202869	16,24879
202909	16,25036
202949	16,27495
202989	16,25904
203029	16,26929
203069	16,26853
203110	16,24675
203151	16,26828
203192	16,25540
203232	16,24222
203272	16,24489
203312	16,26998
203352	16,26701
203392	16,26227
203432	16,24930
203472	16,26373
203512	16,27025
203552	16,25848
203592	16,25539
203632	16,24280

(Fortsetzung – Teil 30)	
Cycle	a
[count]	[mm]
203672	16,26977
203712	16,25712
203752	16,28148
203792	16,24800
203832	16,27935
203872	16,25873
203912	16,27091
203952	16,27842
203992	16,26955
204032	16,27083
204072	16,27804
204112	16,27490
204152	16,27758
204193	16,27113
204233	16,26657
204273	16,27330
204313	16,28664
204353	16,26444
204393	16,27876
204433	16,25109
204473	16,23104
204513	16,21525
204553	16,14069
204593	16,08696
204633	16,16071
204673	16,16671
204713	16,16004
204753	16,16438
204793	16,20894
204833	16,17920
204873	16,22210
204913	16,22585
204953	16,23604
204993	16,20241
205033	16,20786
205073	16,23978
205113	16,21460
205153	16,22719
205193	16,22156
205234	16,25424
205274	16,22929
205314	16,23039
205354	16,24957
205394	16,26563

(Fortsetzung – Teil 31)	
Cycle	a
[count]	[mm]
205434	16,24200
205474	16,24426
205514	16,23975
205554	16,23971
205594	16,23671
205634	16,25136
205674	16,24455
205714	16,22959
205754	16,25143
205794	16,23518
205834	16,26503
205874	16,24997
205914	16,26511
205954	16,23607
205994	16,27603
206034	16,26444
206074	16,27551
206114	16,26442
206154	16,26081
206194	16,25862
206235	16,26593
206276	16,25663
206317	16,26414
206357	16,27674
206397	16,25851
206437	16,27943
206477	16,25317
206517	16,25138
206557	16,25990
206597	16,27016
206637	16,26606
206677	16,26283
206717	16,26395
206757	16,27319
206797	16,27341
206837	16,25032
206877	16,26890
206917	16,26794
206957	16,26847
206997	16,25704
207037	16,26332
207077	16,27607
207117	16,27011
207157	16,27203

(Fortsetzung – Teil 32)	
Cycle	a
[count]	[mm]
207197	16,27798
207237	16,27814
207277	16,25264
207318	16,26279
207359	16,27998
207399	16,29529
207439	16,29472
207479	16,27298
207519	16,27962
207559	16,23637
207598	16,21755
207638	16,11505
207678	16,16734
207718	16,19899
207758	16,18833
207798	16,20811
207838	16,19027
207878	16,23361
207918	16,19359
207958	16,19870
207998	16,17968
208038	16,21898
208078	16,21368
208118	16,24696
208158	16,22915
208198	16,25101
208238	16,23118
208277	16,22957
208318	16,23893
208359	16,22744
208399	16,24631
208439	16,22523
208479	16,26783
208519	16,25581
208559	16,25126
208599	16,23375
208639	16,23802
208679	16,24089
208719	16,24251
208759	16,23995
208799	16,24544
208839	16,24553
208879	16,24147
208919	16,25193

(Fortsetzung – Teil 33)	
Cycle [count]	a [mm]
208959	16,27477
208999	16,27109
209039	16,25790
209079	16,26181
209119	16,27249
209159	16,26294
209199	16,27775
209239	16,27188
209279	16,26489
209319	16,26370
209360	16,25214
209401	16,26807
209442	16,24588
209482	16,27603
209522	16,27206
209562	16,27190
209602	16,27497
209642	16,26141
209682	16,26336
209722	16,25317
209762	16,26173
209802	16,27853
209842	16,26263
209882	16,26499
209922	16,24954
209962	16,21958
210002	16,11300
210042	16,00265
210082	16,19571
210122	16,13871
210162	16,16690
210202	16,17158
210242	16,20010
210282	16,23131
210322	16,21061
210361	16,21453
210401	16,20744
210442	16,20516
210482	16,21478
210522	16,24033
210562	16,23590
210602	16,24887
210642	16,20339
210682	16,23358

(Fortsetzung – Teil 34)	
Cycle [count]	a [mm]
210722	16,22161
210762	16,20044
210802	16,22483
210842	16,21495
210882	16,23991
210922	16,23094
210962	16,24285
211002	16,24772
211042	16,22507
211082	16,24768
211122	16,23508
211162	16,25190
211202	16,25969
211242	16,26025
211282	16,25123
211322	16,27970
211362	16,27846
211402	16,28406
211443	16,21877
211484	16,15607
211524	16,08451
211564	16,00323
211604	16,09639
211644	16,07859
211684	16,07163
211724	16,12606
211764	16,12359
211804	16,14600
211844	16,09489
211884	16,18966
211924	16,16516
211964	16,17712
212004	16,16833
212044	16,20715
212084	16,22720
212124	16,20209
(Ende)	

